



Proyecto Final de Carrera

Ingeniería de Materiales

Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales

Alumno: Agustín Fernández Cañete
Director: Gemma Garcia Alonso

Septiembre 2013



Jo, Gemma Garcia Alonso, professora agregada del departament de física de la UAB, certifico que en :

Agustín Fernández Cañete

Ha realitzat el seu treball final de carrera: “Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales”, sota la meva supervisió.

I perquè així consti signo el present document, el 5 de setembre de 2013.

Gemma Garcia Alonso

Departament de física – UAB
Torre C3-222
Campus UAB – 08193 Bellaterra

ÍNDICE

1. Introducción
 - 1.1. Motivación
 - 1.2. Definiciones
 - 1.2.1. Efecto loto, mojabilidad , autolimpieza
 - 1.2.2. Fases, interfases, contacto hoja-superficie
 - 1.2.2.1. Fase, interfase, interfaz
 - 1.2.2.2. Ecuación de Young. Ángulo de contacto θ
 - 1.2.2.3. Ecuación de Cassie-Wenzel. Histéresis
 - 1.2.2.4. Ecuación de Cassie-Baxter. Efecto loto
 - 1.2.2.5. Desplazamiento de una gota por su superficie
 - 1.2.2.6. Tratamientos superficiales
 - 1.3. Objetivos
2. Experimental y metodología
 - 2.1. Tratamientos
 - 2.1.1. Tratamiento con nitrato de plata
 - 2.1.2. Tratamiento de acido esteárico
 - 2.1.3. Tratamiento con plasma
 - 2.1.4. Nano-tratamientos superficiales
 - 2.2. Materiales estudiados
 - 2.2.1. Cloruro de Polivinilo PVC
 - 2.2.2. Cobre
 - 2.2.3. Aluminio
 - 2.2.4. Mortero
 - 2.2.5. Teflón
 - 2.3. Pruebas y medidas realizadas
 - 2.3.1. Ángulo estático de contacto
 - 2.3.2. Variación de la pendiente de deslizamiento. Histéresis
 - 2.3.3. Capacidad de autolimpieza
 - 2.4. Instrumentos utilizados
 - 2.4.1. Medidor de ángulo de contacto
 - 2.4.2. Plano inclinado
 - 2.4.3. Equipo de plasma de corona
3. Resultados experimentales
 - 3.1. Ángulo de contacto en el plano horizontal
 - 3.1.1. Introducción
 - 3.1.2. Experimentación y análisis de resultados
 - 3.1.3. Conclusiones
 - 3.2. Pruebas en plano inclinado

- 3.2.1. Introducción
 - 3.2.2. Experimentación y análisis de resultados
 - 3.2.3. Conclusiones
- 3.3. Pruebas cualitativas de autolimpieza
 - 3.3.1. Introducción
 - 3.3.2. Experimentación y análisis de resultados
 - 3.3.3. Conclusiones
- 4. Valoración económica del trabajo
- 5. Conclusiones generales
- 6. Bibliografía, tablas e imágenes
- 7. Anexos
 - 7.1. Medida del ángulo de contacto
 - 7.2. Medida de la histéresis
 - 7.3. Técnica de medida ADSA-P
 - 7.4. Tablas de resultados
 - 7.4.1. PVC
 - 7.4.2. Teflón
 - 7.4.3. Cobre
 - 7.4.4. Aluminio
 - 7.4.5. Mortero
 - 7.5. Fichas técnicas
 - 7.6. Justificación económica del presupuesto

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo comienza explicando qué es la “auto-limpieza” y la “hidrofobicidad” en una superficie, las propiedades de la Flor de Loto y los objetivos propuestos. En el mismo Capítulo 1 se definen conceptos y parámetros que aparecerán en los siguientes apartados. En el Capítulo 2 se hablará de los materiales que se han estudiado, sus características y importancia dentro del proceso constructivo, de las pruebas realizadas en ellos y los equipos utilizados en las mismas. En el capítulo 3 se explican los resultados de los experimentos y las conclusiones parciales. En el capítulo 4 se ha hecho una valoración económica del proyecto. En el capítulo 5 se tratan las conclusiones generales.

1.1. Motivación

Un aspecto muy importante en las fases de proyecto y construcción de cualquier tipo de edificación es la impermeabilización o el estudio de cómo se impide y controla la entrada de agua mediante impermeabilización para conducirla y evacuarla de forma ordenada por la correspondiente red de drenaje y saneamiento hasta los puntos de desagüe o almacenamiento previstos.

Por todo ello, reducir las pendientes en las tuberías, aumentar su capacidad de evacuación y disminuir la sedimentación del material arrastrado o en suspensión en agua que transportan, optimizaría el espacio destinado a las instalaciones de suministro y conducción de agua y reduciría el coste del mantenimiento de las mismas evitando problemas como la calcificación, que a la larga acaba obstruyendo y degradando las tuberías (Imagen 1).

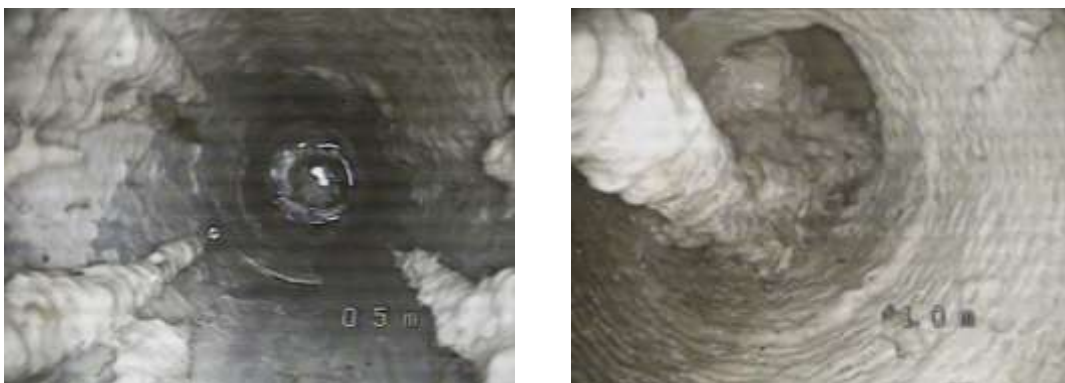


Imagen 1: Dos fotografías del interior de una tubería de PVC afectada por la calcificación. La tubería llega a obstruirse por el carbonato cálcico (imágenes fuente propia).

Sin embargo, a lo largo de mi experiencia profesional en la construcción he podido comprobar la dificultad que existe para encontrar materiales que aprovechen los avances en temas de control de la mojabilidad y fricción del agua, ya sea por precio, desconocimiento o simplemente porque no existen en el mercado.

En los últimos años han aparecido tratamientos superficiales biomiméticos que proporcionan propiedades de autolimpieza, hidrofobicidad y oleobicidad a las superficies sobre las que se aplican. Especialmente se utiliza el llamado “efecto loto” que simula en la superficie del material en cuestión la microestructura de la hoja de flor de loto. En las hojas de la flor de loto la gota de agua que se desliza por su superficie no se rompe, permanece esférica; este fenómeno se conoce como súper-hidrofobicidad. Tampoco las partículas (polvo, impurezas, etc.) quedan suficientemente adheridas a la superficie de la hoja y así la gota de agua las arrastra en su desplazamiento los sin empapar la hoja. En este caso se habla de fenómeno de autolimpieza.

Existen a la venta diferentes tratamientos que dicen conseguir estos efectos al aplicarlos en elementos de uso común (automoción, ventanas, suelos, etc.). Utilizaremos varios de estos tratamientos sobre materiales utilizados en la construcción; PVC (cloruro de poli-vinilo), cobre, aluminio, teflón y mortero de cemento portland; estudiaremos cómo se modifica la mojabilidad de las superficies, la pendiente mínima de deslizamiento del agua sobre su superficie y la posible mejora de la capacidad de arrastre de residuos.

1.2. Definiciones

Aunque Leonardo da Vinci (1452-1519) observa el movimiento del agua (Ilustración 1) y habla del “mojado de una superficie”, no es hasta el siglo XIX que Thomas Young y Pierre Simon Laplace (1805) explican el proceso y teorizan sobre el equilibrio de una gota líquida sobre una superficie sólida ideal utilizando un parámetro muy importante, del cual se hablará más adelante; el ángulo de contacto o intrínseco que forma la gota con la superficie.



Ilustración 1: Dibujo de Leonardo da Vinci del movimiento del agua en una catarata.

Posteriormente, Wenzel describe el efecto de la estructura de las superficies no lisas sobre el ángulo de contacto de la gota utilizando el parámetro r , el cual relaciona dos ángulos de contacto; el aparente (entre la superficie rugosa y la gota) y el intrínseco de Young (Ilustración 7). Años más tarde Baxter estudia las superficies heterogéneas no lisas.

Por tanto, para explicar qué ocurre en la capa de contacto de la superficie con la gota de agua se han de utilizar entre otras las teorías de Thomas Young, la ecuación de Cassie-Wenzel, la ecuación de Cassie-Baxter y la de Johnson y Dettre, que describiremos a continuación.

1.2.1. Efecto loto, mojabilidad, auto-limpieza

Considerada símbolo de pureza y relacionada con la divinidad en diferentes culturas asiáticas por su permanente estado de limpieza y tersura, la superficie de la hoja de la Flor de Loto (*Nelumbo Nucifera*) posee unas particularidades que hacen posible que tenga ese estado en ambientes húmedos y pantanosos. Sin tener ese carácter “divino”, otras especies vegetales que podemos ver más a menudo en occidente, como los tulipanes o los narcisos, también parecen estar permanentemente limpias.

La forma como interactúan agua y superficie en las hojas permite que una gota se desplace con mucha facilidad y que en su movimiento arrastre las partículas que se encuentran en la superficie. Como podemos ver en la Imagen 2 de una gota de agua sobre una hoja de flor de loto y sobre otro tipo de planta, la gota tiene una forma cuasi esférica y se aprecia una capa azulada brillante en su base, reflejo del cielo en la capa de aire que existe entre la gota y la hoja. Esta capa de aire es la que permite, a modo de colchón, que la gota se desplace con tanta facilidad por la hoja, análogamente a lo que ocurre por el efecto Leidenfrost¹ cuando sobre una plancha metálica caliente ponemos agua



¹ Efecto Leidenfrost: Fenómeno que se produce al formarse una capa de vapor de un líquido que está colocado sobre una superficie a temperatura significativamente más alta que la temperatura de ebullición de dicho líquido.

Imagen 2: Izquierda: Fotografía de una gota de agua casi esférica sobre una hoja de flor de loto. Derecha: mismo efecto en una hoja de otra planta donde las gotas no son tan esféricas como en la imagen anterior de la flor de loto.

El estudio detallado de las superficies de las hojas de las plantas permite explicar este fenómeno. Vamos a ver que en el caso de la flor de loto se unen dos características complementarias: i) la existencia de un revestimiento, una membrana extracelular o “cutícula” (ver Imagen 3.a) cuya función principal es de barrera a la transpiración, aunque también proporciona estabilidad estructural a toda la superficie, refleja la luz y forma pequeñas turbulencias de aire permitiendo “controlar” la temperatura de la hoja y ii) una micro estructura particular, como se observa en la Imagen 3.c y d, formada por protuberancias de entre 5 y 10 micrómetros de diámetro, formadas así mismo por un entrelazado de fibras de cera cristalizada de unos 200 nm de diámetro.

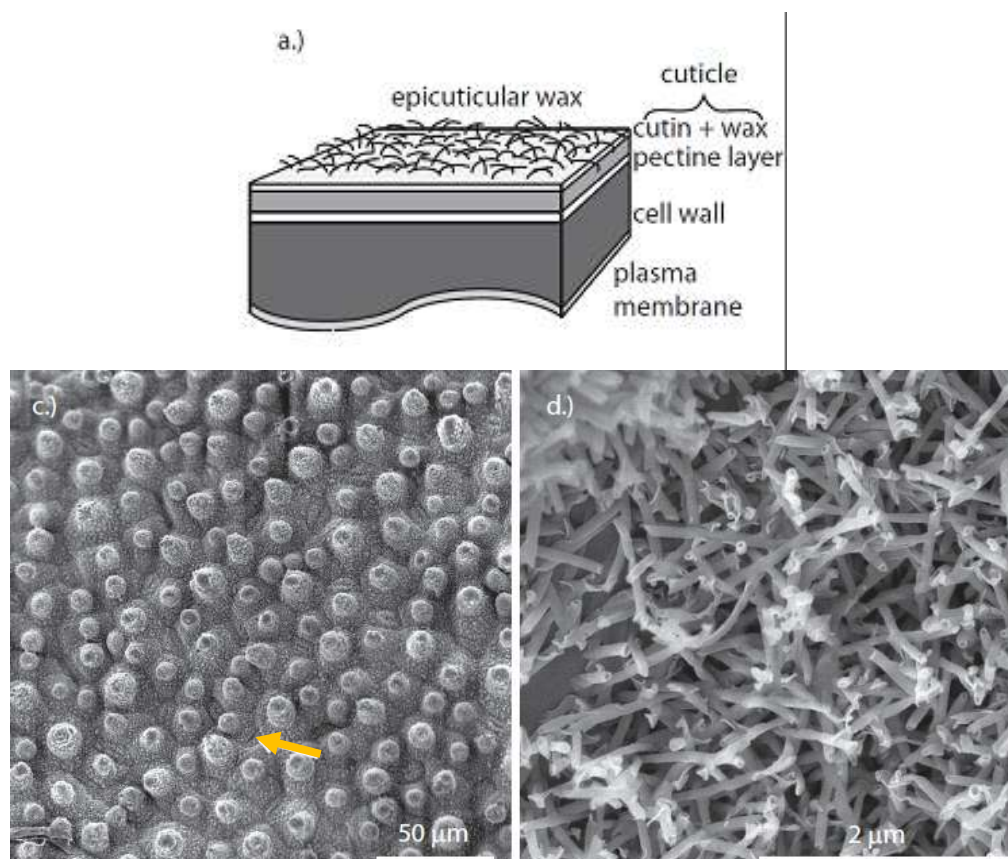


Imagen 3: a.) Croquis de cutícula y la estructura estratificada de la epidermis de una hoja. En algunas plantas, además de la cutina, existen filamentos de cera que dan un entramado tridimensional a la superficie. c.) Imagen SEM de la superficie de la hoja de Flor de Loto donde se aprecian protuberancias cónicas que y, en el espacio que hay entre ellas, unas fisuras (ver flecha) por donde la hoja realiza la transpiración. d.) Imagen SEM de la superficie ampliada de las protuberancias donde se aprecia que está formada por filamentos de cera cristalina. [1]

La cutícula es un composite constituido por una capa de cutina² y ceras hidrofóbicas. En la flor de loto, además de la capa de cera bidimensional, existe otra tridimensional de filamentos de cera cristalizada. La rugosidad a escala microscópica está constituida por las protuberancias cónicas que están separadas por $21\pm 7\text{ }\mu\text{m}$. Entre las protuberancias se sitúan las fisuras por donde la hoja realiza el intercambio de gases (O_2 , CO_2 y H_2O) (ver flecha de la Imagen 3.C). Además toda la superficie se haya cubierta por la capa hidrofóbica tridimensional de cera cristalizada, en este caso nonacosanol $\text{C}_{29}\text{H}_{60}\text{O}$ [1].

La perfecta combinación de composición química y arquitectura o topografía de la superficie consigue que la gota de agua no moje la superficie sino que sea repelida por ella, demostrando así un comportamiento hidrofóbico. Si además el ángulo de contacto entre la gota y la superficie es mayor de 150° se produce lo que se denomina superhidrofobicidad. Debido a la alta tensión superficial y a la hidrofobicidad de la superficie, una gota de agua que descanse sobre ella solamente se apoyará en las puntas de las protuberancias, quedando el aire atrapado entre el espacio de separación y la lámina de agua de la gota, esto hace que la gota mantenga la forma quasi-esférica como si estuviera envuelta sólo de aire. Además, debido a que hay muy pocos puntos de contacto, es muy fácil que la gota se desplace sobre la hoja rodando en lugar de deslizándose.

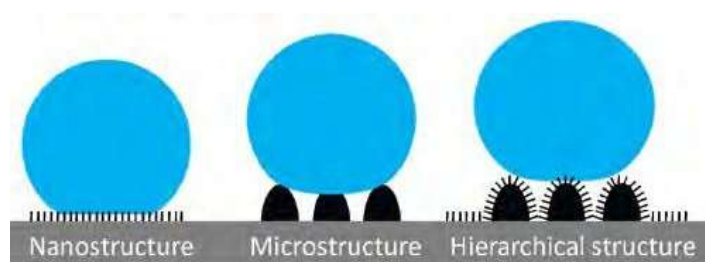


Ilustración 2: La combinación de composición química y topografía de la superficie proporciona un comportamiento hidrofóbico.

Barhlott y Neinhuis han investigado el **proceso de auto-limpieza** en diferentes condiciones para el caso de la hoja de Flor de Loto y de otras plantas. En su trabajo explican cómo las partículas más grandes que la separación entre protuberancias superficiales se apoyarán sólo en éstas, las más pequeñas quedan atrapadas entre ellas. Sin embargo en este caso, debido a la capa de fibrosa de cera cristalizada, también los puntos de contacto de la impureza con la superficie serán muy pocos. Por esto, una gota que rodando tope con la partícula se la llevará consigo porque tiene más superficie de contacto que la propia superficie de la hoja.

También, Barhlott y Neinhuis, explican cómo la lluvia ejerce un momento al impactar con la superficie de la hoja produciendo una deformación elástica en las

² La "cutina" es un polímero formado por muchos ácidos grasos de cadena larga, que están unidos unos a otros por uniones éster, creando una red rígida tridimensional [20]

protuberancias y en las impurezas situadas entre ellas. La presión del agua en el momento del impacto puede alcanzar los 105Pa en una lluvia intensa. Una vez sueltas las partículas, las gotas rodando sobre la hoja las arrastran³. [2]

Con ello vemos que para que se produzca la auto-limpieza en la hoja se tiene que poner en marcha un complejo mecanismo a diferentes escalas en el que todos tienen su papel; la lluvia y la planta a nivel estructural, así como la gota de agua y la superficie de la hoja.

El resultado de tener superficies con un ángulo de contacto entre gota y superficie superior a 150° y que repelen totalmente el agua es que se obtienen superficies autolimpiantes, antihumedad, antiadhesión, anticorrosión, resistentes a las manchas y a la proliferación de organismos.

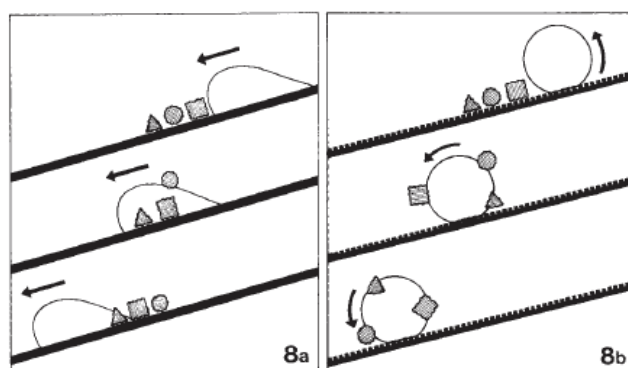


Ilustración 3: En este esquema se puede ver cómo afecta la superficie al efecto de autolimpieza, a la izquierda sin el efecto de autolimpieza y con la gota atravesando las partículas de la superficie por ser ésta lisa y la derecha, al ser una superficie rugosa, la gota atrapa a las partículas y las arrastra [1].

Superficie auto-limpiante

Entre las definiciones de superficie auto-limpiante, la que me ha parecido más interesante es la que la define como *una superficie rugosa e hidrofóbica en la que una gota de agua es capaz de mantener una capa de aire en su parte inferior, provocando todo ello la reducción de los puntos de contacto entre la gota y la superficie* [1]. En esta definición ya se puede comprender que la condición de auto-limpieza de una superficie depende de varios factores (características químicas, estructura de la superficie, relación de las interfases) que en la *Ilustración 4* se indican de forma esquemática.

Si la superficie de la hoja es rugosa y no existe colchón de aire, es decir, que la gota empapa toda la superficie, se dice que es el estado de Wenzel. Si la rugosidad de la superficie permite la formación de un colchón de aire bajo la gota de forma que ésta se

³ Este efecto aparecerá en el experimento de autolimpieza de la tubería de PVC.

apoye puntualmente en la superficie, se dice que es el estado de Cassie. Ambos estados encabezan el esquema de la *Ilustración 4*.

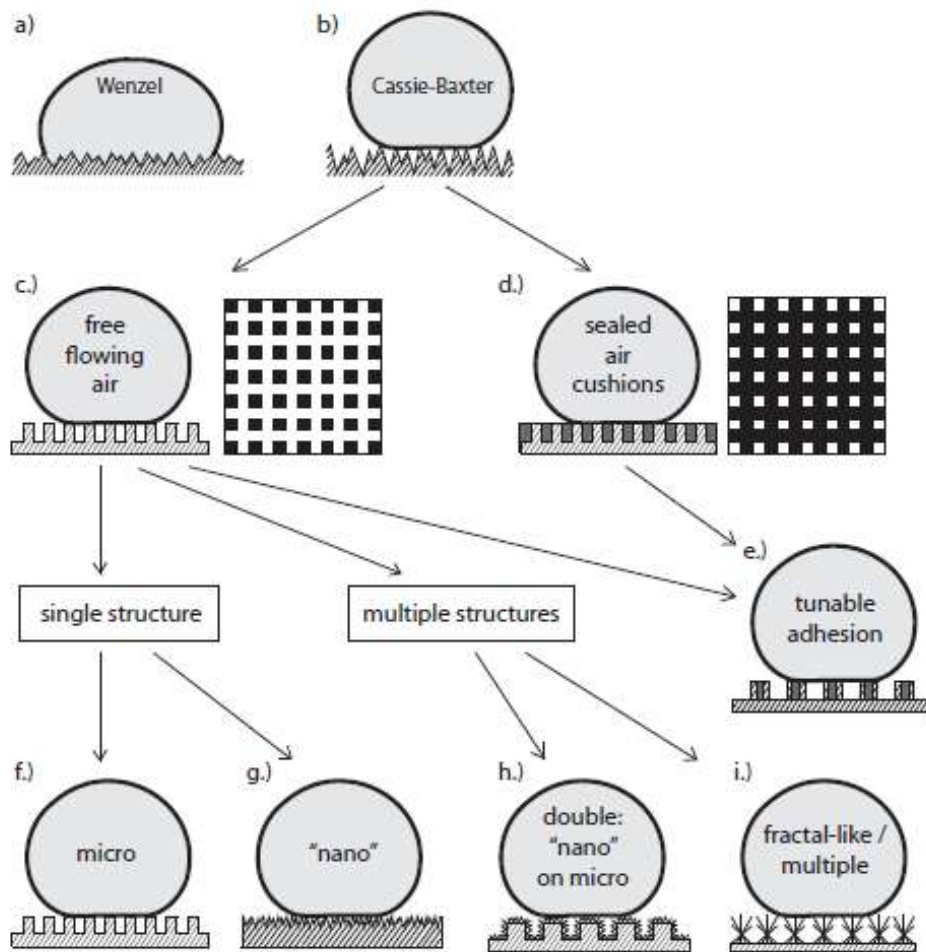


Ilustración 4: Diferentes estados de mojado, según las características de la superficie sobre la que descansa la gota: (a) Estado de Wenzel, hidrofilia, en la que la gota empapa y contacta con toda la superficie, (b) estado de Cassie-Baxter, hidrofobia, en la que la gota se apoya en un “colchón” de aire, (c) la gota se apoya en la superficie y el aire exterior circula por debajo, (d) al estar confinado el aire no circula por debajo de la gota, (e) combinación de los efectos c y d. Se pueden construir superficies auto-limpiantes con estructuras simples (f) y (g) o por combinación de varios efectos (h) e (i). [1]

A partir de los estados de Wenzel y Cassie los científicos explican numerosas propiedades como la *súper-hidrofobicidad* y la *ultra-hidrofobicidad*, de las que se han sugerido propuestas de unificar criterios de definición:

- i) la *súper-hidrofobicidad* se alcanzaría cuando la gota de agua tuviera un ángulo de contacto con la superficie superior a 150° . Con un ángulo de histéresis (ver apartado 1.2.2.3) inferior a 10° esas superficies son repelentes al agua y tienen propiedades de autolimpieza o *efecto lotus* [2].

- ii) La *ultra-hidrofobicidad* se da con ángulos de contacto entre 120° y 150°. [1] [3]

1.2.2. Fases, interfases, tensión superficial y ángulo de contacto

1.2.2.1. Fase, interfase e interfaz

Cuando se habla del contacto de entre dos fluidos no miscibles nos referimos a la interacción entre ambos a través de la superficie que los delimita o “**fase**”. La zona intermedia tridimensional entre las dos fases se denomina “**interfase**” y su espesor es del orden de 10nm, o sea casi-bidimensional. Las características de las interfases van a depender de los fluidos que la forman. La superficie imaginaria de separación entre dos fases es la “**interfaz**” o superficie de Gibbs [4].

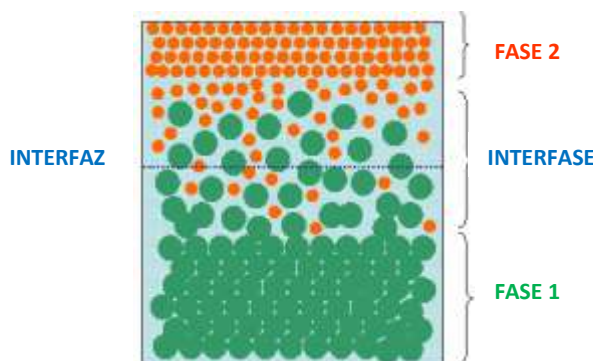


Ilustración 5: Representación esquemática de una interfase y una interfaz [4]

Las interfases se comportan mecánicamente como membranas tensas, con una tensión independiente de su área. Cuando están en equilibrio existe una diferencia de presión transversal Δp , caracterizada por la ecuación de la **ley de Young-Laplace** (1805):



$$\Delta p = \sigma C \quad 1$$

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad 2$$

Donde C es la curvatura local y σ la tensión superficial, que depende de los medios en contacto y de la temperatura. Esta ley dice que la diferencia de presiones (Δp) a ambos lados de un punto de la interfaz es proporcional a la semisuma de las inversas de los radios principales de curvatura (R_1 , R_2) y la constante de proporcionalidad es la tensión interfacial γ_{LF} . El desarrollo de esta ley explica entre otras cosas que:

- La forma de la interfaz entre dos fases, a igual presión y equilibrio hidroestático, es plana.
- En toda interfaz curva en estado hidroestático la presión en la zona cóncava de la interfaz es mayor que en la zona convexa.

La gota de agua en contacto con una superficie forma un sistema de tres fases donde una fase líquida está en contacto con una fase sólida dentro de una fase fluida (líquido-vapor). Este entorno físico es llamado **sistema de mojado** y es estudiado por la Termodinámica de Superficies e Interfases y específicamente los fenómenos relacionados con las regiones de separación entre fases sólido-líquido-vapor en sustancias químicamente puras.

1.2.2.2. Ecuación de Young. Ángulo de contacto θ

La superficie de la gota depende de la acción de las fuerzas que intervienen en la línea de contacto sobre la superficie del sólido, en la que se encuentran las tres fases; sólido-líquido, líquido-gas y sólido-gas [5]. Las fuerzas que actúan en este punto son tensiones superficiales que se relacionan (ver *Ilustración 6*) según la **ecuación de Young (1805)** [6]:

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta_y \quad 3$$

Donde γ son las tensiones superficiales entre cada una de las tres interfases (sólido, líquido, gas) y θ_y es el ángulo de contacto con la superficie o ángulo de Young.

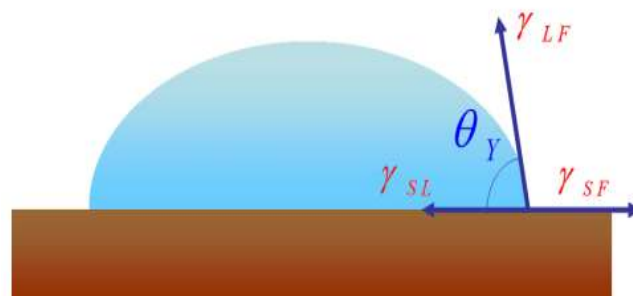


Ilustración 6: Esquema donde se indica el ángulo de contacto y las tensiones superficiales.

Si la suma de las tensiones de las interfases sólido-líquido y líquido-gas es igual a la suma de las tensiones de la interfase sólido-gas, el valor de θ es cero y el agua cubrirá la superficie. Pero si el valor de las tensiones de la interfase sólido-gas es nulo entonces $\theta=180^\circ$ y la superficie permanece seca.

A partir de este criterio clasificamos las superficies según θ en la tabla

Mojabilidad indefinida	Hidrófila	Hidrófoba
$\theta_{ob}^{max} > 90^\circ, \theta_{ob}^{min} < 90^\circ$	$\theta_{ob}^{max}, \theta_{ob}^{min} < 90^\circ$	$\theta_{ob}^{max}, \theta_{ob}^{min} > 90^\circ$

Tabla 1: Clasificación de las superficies en función de los ángulos observables θ_{ob} máximo y mínimo.

Al término **cos θ_y** de la ecuación 3 se le denomina *mojabilidad μ* :

$$\mu \equiv \frac{\gamma_{SF} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LF}} \quad 4$$

Y con este parámetro, la ecuación de Young quedaría:

$$\mu = \cos \theta_y \quad 5$$

- Cuando la mojabilidad μ es positiva se dice que el líquido moja y la superficie es **hidrófila**.
- Cuando la mojabilidad μ es negativa se dice que no moja, la superficie es **hidrófoba**⁴

La ecuación de Young indica cómo se extiende un líquido sobre una superficie, es invariante en presencia de gravedad y sólo es válida para superficies ideales (lisas, homogéneas, no porosas, rígidas y químicamente inertes). El ángulo de contacto θ sólo depende de las propiedades físico-químicas de las tres fases [7] [4].

Gibbs, en 1878, modifica la ecuación Young teniendo en cuenta el tamaño de las interfases, o lo que es lo mismo, teniendo en cuenta el efecto de una interfase sobre las otras dos (efecto químico), y estudiando cómo afecta al ángulo de contacto con la superficie de las gotas pequeñas (<1 μ l). Según Gibbs, las gotas de agua pequeñas adoptan una forma esférica y la interfase líquido-gas se encuentra con la superficie sólida formando un ángulo θ_i o “**ángulo intrínseco**” en la **ecuación de Young generalizada**:

$$\cos \theta_i = \cos \theta_Y - K_g \frac{\sigma_{SLF}}{\gamma_{LF}} \quad 6$$

Donde σ es la energía en la interfase, γ las tensiones superficiales, K_g es el término que introduce la dependencia con el tamaño de la gota y θ_i el **ángulo intrínseco**.

⁴ Se utiliza el prefijo “hidro-” porque nos referimos al agua; si no debería usarse higrófono.

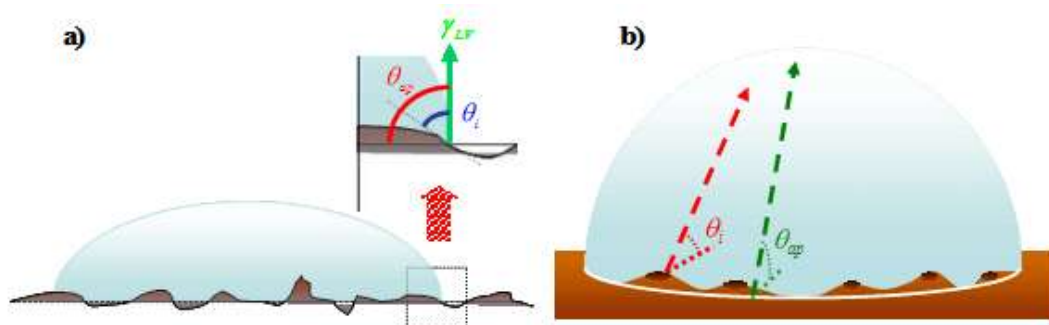


Ilustración 7: Representación esquemática de los ángulos intrínseco y aparente sobre una superficie rugosa: a) Homogénea y b) heterogénea. [4]

1.2.2.3. Ecuación de Cassie-Wenzel. Histéresis

En el mecanismo de desplazamiento de la gota por una superficie intervienen dos ángulos de gran importancia; el ángulo de **avance** θ_a y el de **retroceso** θ_r . como vemos en la Ilustración 8, el ángulo de avance es el observado cuando la fase líquida avanza sobre la fase sólida a expensas de la fase fluida [4] y el ángulo de retroceso se da cuando la fase líquida retrocede sobre el sólido a favor de la fase fluida y si la superficie es homogénea su valor es de 90° . La diferencia de ambos ($\theta_a - \theta_r$) es lo que se conoce como **histéresis**.

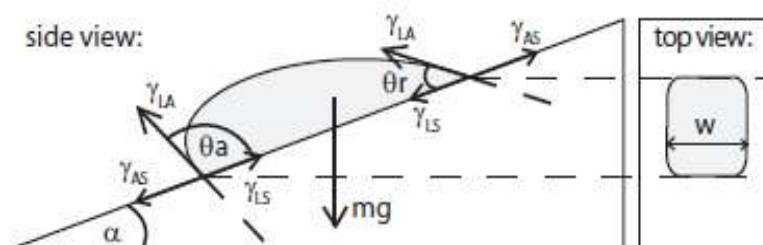


Ilustración 8: Esquema de los ángulos de avance θ_a y retroceso θ_r , empleados en la ecuación de Wenzel [1].

El valor de la **histéresis** es consecuencia de la rugosidad y de la heterogeneidad de la superficie y de cómo ambas afectan al desplazamiento de la gota (pérdida de energía) y también depende del líquido (volumen, forma de colocar la gota sobre la superficie, entre otros) [4]. La gota, una vez depositada sobre una superficie real, evoluciona hasta una situación de mínima energía o *equilibrio metaestable* (en la superficies reales esta situación no es única). A esta configuración se le denomina equilibrio o metaestado y cada metaestado tiene asociado un ángulo fenomenológico, de los que destacan tres:

- Ángulo de contacto de equilibrio metaestable (θ_{Eq}), que se da en configuración de mínima energía global.

- Ángulo de contacto de avance (θ_a), que se da cuando el líquido avanza sobre la superficie.
- Ángulo de contacto de retroceso (θ_r), que se da cuando el líquido retrocede sobre la superficie.

Aunque no hay un modelo que determine y explique este efecto en profundidad, su medición se puede hacer con facilidad gráficamente como vemos en la Ilustración 8.

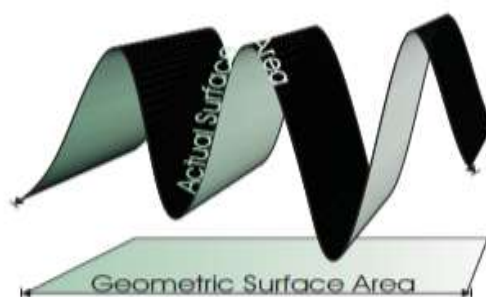


Ilustración 9: Relación entre la superficie geométrica o proyectada y la superficie real.

A partir de las diferencias entre la superficie real y la superficie geométrica de contacto de la gota (*Ilustración 9*), Wenzel (1936) tiene en cuenta el efecto de las características superficiales o rugosidad en su ecuación introduciendo el **ángulo aparente de contacto θ^*** (diferente del *ángulo de contacto de Young*) (*Ilustración 7*) de la gota con la superficie, estableciendo una relación entre el ángulo de equilibrio y el ángulo intrínseco:

$$r = \frac{\text{Superficie Real}}{\text{Superficie proyectada}} \quad 7$$

$$\cos \theta_{Eq} = r \cos \theta_i \quad 8$$

$$\theta^* = r \cos \theta_i \quad 9$$

Donde θ_{Eq} es el ángulo de equilibrio aparente, θ_i el ángulo intrínseco y “r” el factor de Wenzel, que indica la rugosidad de la superficie. En superficies lisas $r=1$ y en rugosas $r>1$. El efecto químico de la superficie lo da θ_i al relacionar las interfases del sistema.

De la ecuación se deduce que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Para } \theta_i < 90^\circ (\text{contacto hidrófilo}) \Rightarrow \theta^* < \theta_i \Rightarrow \text{la rugosidad aumenta la hidrofiliidad} \\ \text{Para } \theta_i > 90^\circ (\text{contacto hidrófobo}) \Rightarrow \theta^* > \theta_i \Rightarrow \text{la rugosidad aumenta la hidrofobicidad} \end{array} \right.$$

Esta ecuación es aplicable en aquellas situaciones en las que el líquido cubre totalmente la rugosidad de la superficie, esto es, en estado de Wenzel.

Ecuación de Cassie-Baxter. Efecto loto

Para superficies heterogéneas y rugosas el ángulo de equilibrio se determina utilizando conjuntamente las ecuaciones de Wenzel (para superficies homogéneas rugosas) y Cassie (para superficies heterogéneas lisas), de lo que resulta la **ecuación de Cassie-Baxter** (1944):

$$\cos \theta_{eq} = \varphi_s r_w \cos \theta_i - (1 - \varphi_s) \quad 10$$

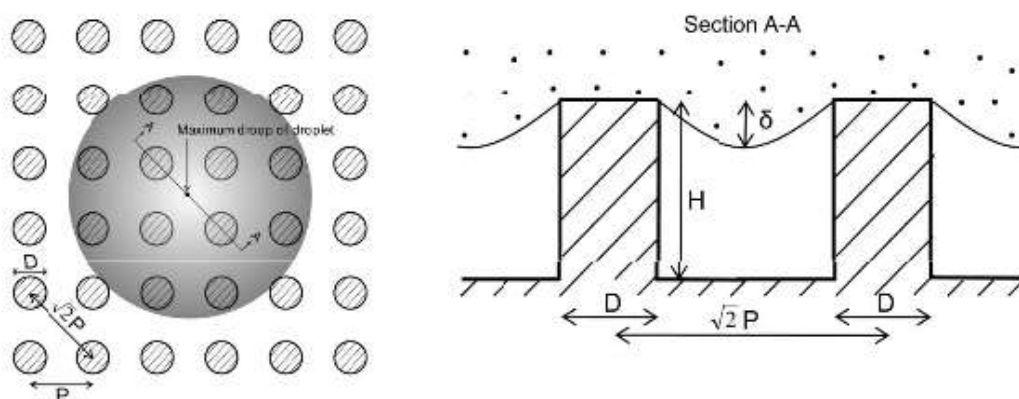
Donde φ_s es la fracción de área proyectada de la superficie sólida mojada por el líquido, $(1 - \varphi_s)$ es la fracción de área de la zona entre puntos de apoyo y r_w es el coeficiente de rugosidad de dicha área mojada.

La formación de burbujas debajo de la gota se produce para $r_w \cos \theta_i < -1$, por tanto, al aumentar r_w se pueden dar dos situaciones:

- Que el líquido moje totalmente la superficie
- Que se formen gotas en la interfase S-L (sólido-líquido)

Para éste último caso, el ángulo de contacto es muy elevado y si se inclina la superficie la gota no se desliza sino que rueda, dándose lo que se denomina el “**efecto loto**” y que produce la auto-limpieza de la superficie.

Pero muchas superficies en un estado de Cassie-Baxter permiten que una gota esté apoyada e incluso rueda ligeramente, sin embargo, si se presionara o si la gota cayera desde una cierta altura rellenaría toda la superficie quedando en un estado de Wenzel. Esta resistencia de algunas superficies para pasar del estado de Cassie-Baxter al de Wenzel depende de la hidrofobicidad química y de la separación entre irregularidades superficiales [3]. La relación entre la presión ejercida por la gota con su curvatura máxima está definida por la **ecuación de Laplace**: [2]



$$\delta \approx \frac{(\sqrt{2}P-D)^2}{R}$$

11

Si $\delta \geq H \rightarrow$ Hay transición del estado de Cassie-Baxter al de Wenzel

En la Ilustración 10 se tienen los principales estados de mojado descritos hasta ahora:

- a) El **estado de Wenzel**, que ocurre en todo tipo de superficies.
- b) El **estado de Cassie-Baxter**, que se da en superficies de baja energía superficial.
- c) La situación de **mojado total**, en superficies muy rugosas (alta energía superficial)

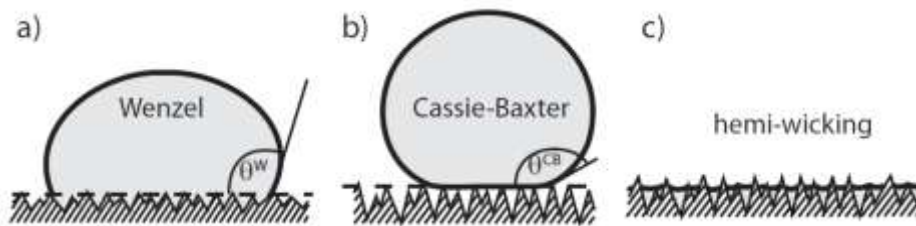


Ilustración 10: Las tres formas principales de mojado de una superficie; (a) estado de Wenzel, en el que el líquido se adapta a la topografía de la superficie, (b) estado de Cassie-Baxter, en el que la gota se apoya en los salientes de la superficie y (c) en donde el líquido se ha derramado por toda la topografía del sustrato [1].

Ambas expresiones, la de Cassie-Baxter y la de Cassie-Wenzel, no están aceptadas del todo por muchos científicos y para ser válidas han de darse circunstancias tales como que el tamaño del sistema mojado sea varios órdenes de magnitud mayor al tamaño característico de las irregularidades superficiales, sobre las cuales la gota está apoyada.

El desplazamiento de la gota por un plano inclinado

Furmidge (1962) estudió las condiciones que necesita una gota para mantenerse sobre un plano inclinado y estableció en una ecuación todas las fuerzas que intervenían definiendo una correlación entre la inclinación α de la superficie y la masa de la gota m , el diámetro perpendicular a la dirección de deslizamiento ω , los ángulos de avance θ_a y retroceso θ_r y la tensión superficial del líquido γ_{LA} :

$$m * g * \sin \alpha = \omega * \gamma_{LA} * (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad 9$$

17

Para poder explicar el deslizamiento de una gota sobre una superficie lisa Furmidge, en su trabajo, asume que la huella de la gota cuando se desliza sobre la superficie es un rectángulo (ver **Ilustración 8**).

Para poder calcular la energía superficial γ en la expresión de Furmidge, tenemos que Young la relaciona las energías superficiales de cada interfase con el ángulo de contacto θ en la ecuación de Young-Dupré:

$$w_{SL} = \gamma_{LA} + \gamma_{LA} - \gamma_{LA} = \gamma_{LA} * (1 + \cos \theta) \quad 12$$

Como hemos explicado, los ángulos θ_a y θ_r , en consecuencia la histéresis, dependen de muchos factores como la irregularidad superficial, la homogeneidad química, velocidad y volumen de la gota, etc. y aunque no hay un modelo de cálculo de la histéresis ésta se puede obtener mediante la medida dinámica de los ángulos de contacto [1].

1.3. Objetivos

El **objetivo general** del trabajo consiste en el estudio de diferentes tratamientos hidrofílicos e hidrofóbicos aplicados en los materiales y más específicamente comprobar el comportamiento de estos tratamientos aplicados en materiales de uso habitual en la construcción, entre otros:

- PVC; por su uso en instalaciones de evacuación de agua.
- Cobre; por su uso en fontanería.
- Mortero de cemento portland; por su uso en todo tipo de revestimientos y conducciones y canalizaciones de agua.

Para poder alcanzar esos objetivos deberemos antes realizar los siguientes **objetivos parciales**:

- Medir el ángulo de contacto estático del agua en las superficies de PVC tratadas con Nanotool, Tecnadis, plasma de arco.
- Medir el ángulo de contacto estático del agua en las superficies metálicas tratadas con nitrato de plata, ácido esteárico, Nanotool, Tecnadis, plasma de arco.
- Medir el ángulo de deslizamiento en PVC y metales, tratados con Nanotool y Tecnadis.
- Comprobar la autolimpieza en superficies de PVC tratadas con Nanotool y Tecnadis.

2. EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

2.1. Tratamientos

Trabajaremos con diferentes tratamientos, en función del objetivo deseado y del material o superficie a tratar:

i) Tratamientos químicos:

- Nitrato de plata, aplicación idónea para metales.
- Ácido esteárico, idónea para el cobre.
- La combinación de ambos.

ii) Tratamiento físico:

- Plasma de corona, aplicación idónea para polímeros.

iii) Tratamientos industriales con nano-revestimientos :

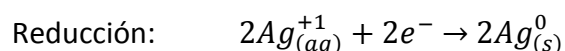
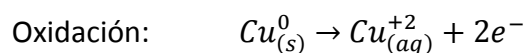
- Nanotool, idóneo en materiales porosos
- Tecnadis Perfect y Tecnadis Effect, indicados en materiales porosos, poco porosos y polímeros

2.1.1. Nitrato de Plata

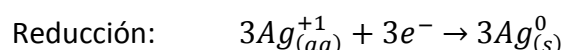
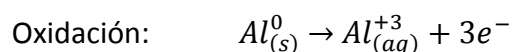
Aplicado sobre dos láminas de cobre y otra de aluminio. Se introducen las láminas en el recipiente con nitrato de plata AgNO_3 , lo que provoca una reacción simple entre el nitrato y los metales, reduciéndose los iones Ag^+ . Este tipo de reacción se denomina de “desplazamiento” en la que el cobre, por ser más reactivo, desplaza a la plata adhiriéndosele.

Con el tratamiento de nitrato de plata se consigue enlazar los iones de Cu con los del metal, de manera que se forme una nano-rugosidad en la superficie del cobre.

Las reacciones redox que tienen lugar son para el cobre:



Y para el aluminio:



Se retiran las láminas del recipiente con nitrato, se lavan con agua destilada y se dejan secar al aire libre.

2.1.2. Ácido esteárico

Se han introducido dos láminas de cobre (una de ellas tratada con AgNO_3) en un recipiente con ácido esteárico $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ y se han dejado en reposo hasta que se han oscurecido.

La molécula de ácido esteárico tiene una cola hidrófila que se enlaza con la superficie de cobre, quedando el extremo hidrófobo “al aire”.

stearic acid, $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$

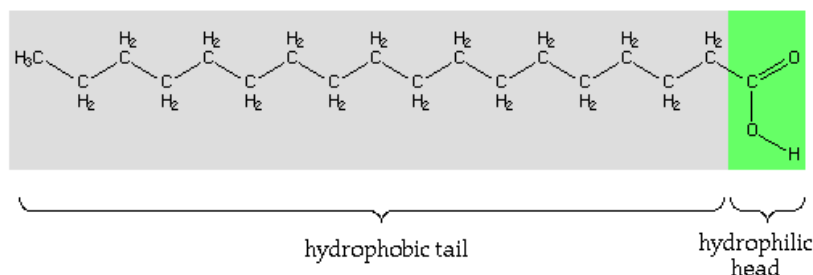


Ilustración 11: Fórmula del ácido esteárico con la parte hidrofílica que se enlaza con el cobre marcada en verde [8].

Se retiran las láminas del recipiente con ácido, se lavan con etanol y se dejan secar al aire libre. Una lámina de cobre ha recibido secuencialmente los dos tratamientos, por lo que tendrá la superficie con un tratamiento físico (la plata adherida a la superficie) y otro tratamiento químico (la parte hidrófoba del ácido esteárico al “aire libre”).

2.1.3. Plasma

Al crear una descarga a través del aire se generan iones y radicales como el ozono u óxidos de nitrógeno que reaccionan con la superficie cercana. La superficie bombardeada por iones y electrones puede así mismo producir radicales reactivos. Todo ello produce el cambio de los componentes en superficie provocando grupos polares entre otros y alterando por lo tanto la energía de superficie y al mismo tiempo la hidrofiliidad y mojabilidad de las mismas.

Se ha aplicado este tratamiento a láminas de teflón, PVC, cobre y aluminio. Cada una de las superficies de han sometido a este tratamiento durante 30'' y 60'' y posteriormente se han medido los ángulos de contacto.

2.1.4. Nano-tratamientos superficiales

Se han aplicado los siguientes tratamientos superficiales:

- *Cenano-Nanotool*© Primer y *Cenano-Nanotool*© Sealant
- *Tecnadis*© PRS Effect
- *Tecnadis*© PRS Performance
- STO ©Lotusan , aplicado en fábrica

El material de la casa Nanotool, necesita tratarse en dos capas; una previa o “primer” y luego la aplicación principal. Los del tipo Tecnadís no necesitan el “primer” pero también se da en dos capas y hay que esperar 24-48 horas para que haga efecto.

Además se ha estudiado una muestra de una superficie porosa sobre la que se ha aplicado Lotusan de la casa STO. Esta muestra venía ya preparada de fábrica.

Todos los tratamientos se aplican mediante gamuza, pincel o rodillo, según las dimensiones de superficie a aplicar.

Los materiales tratados son el aluminio, el cobre y el PVC. El proceso se ha hecho en dos fases; la primera, en la que se han utilizado láminas de cada uno de los materiales y se han medido los ángulos de contacto y el ángulo de inclinación necesario para que el agua deslice. En la segunda fase, se ha utilizado tramos de tubería comercial de PVC para comprobar el ángulo de inclinación y el efecto de autolimpieza.

De todos estos materiales se adjunta la ficha técnica, no obstante su formulación es confidencial y desconocida para nosotros.

2.2. Materiales estudiados

2.2.1. PVC

Polímero de la familia de los vinílicos [9] en el que un H se sustituye por un Cl que, al ser más voluminoso le proporciona más rigidez y resistencia mecánica, pero también más fragilidad. Tiene buena resistencia química (es poco soluble) y no tolera bien los rayos UV ni el calor (su Tg es de 87°C)⁵.

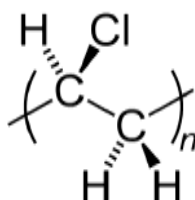


Ilustración 12: Molécula del PVC

⁵ Tg: Temperatura de transición vítrea. Es la temperatura a partir de la cual las cadenas poliméricas comienzan a volverse flexibles.

Es muy utilizado en tuberías y otros elementos de la construcción (ventanas, fachadas, instalaciones eléctricas, etc.) por su bajo coste y alta rigidez y se suelen mejorar sus propiedades de flexibilidad y deformabilidad mediante el uso de aditivos.

2.2.2. Cobre

Metal no ferroso situado en la tabla periódica dentro del grupo de los metales de transición, de número atómico 29. De color rojizo, es un material blando (dureza 2,5-3), dúctil y maleable. Debido a estas características resulta difícil de mecanizar, es muy trabajable en frío y resiste muy bien la corrosión en la mayoría de ambientes. Es muy utilizado como conductor eléctrico y en tuberías.

2.2.3. Aluminio

El aluminio, de símbolo 'Al', es un mineral no ferromagnético, de número atómico 13 cuyas características principales son que es ligero, dúctil, de buena conducción térmica y eléctrica y resistente a la corrosión. Su estructura atómica es cúbica centrada en las caras.

Por su poco peso, trabajabilidad y relativamente bajo coste es profusamente utilizado en carpinterías, revestimientos y fachadas, entre otros.

2.2.4. Mortero

Mezcla preparada in situ a partir de mortero comercial en seco, diseñado para uso corriente (G), fabricado en central según Norma UNE EN 998-2, servido en sacos para ser preparado en hormigonera añadiendo 3 litros de agua por cada saco de mortero (0,12 litros / kg.) y amasado hasta conseguir una pasta homogénea.

Componentes:

- Cemento CEM IIA-L/ 42,5 R ⁶
- Arena : 0/2 Calizo ó Silicio

Campo de aplicación:

- Obras de fábrica cerámica para colocación de interiores
- Colocación de tejas
- Soporte de pavimentos (capa de soporte de adhesivo cementoso)

⁶ Cemento Portland con adición de caliza y moderada resistencia a los sulfatos, una resistencia a la compresión a los 20 días >20MPa y a los 28 días 42.5MPa.

2.2.5. Teflón

En el politetrafluoroetileno o Teflón es un polímero en el que los hidrógenos se han sustituido por flúor. El flúor es poco voluminoso por lo que el teflón forma materiales de elevada cristalinidad pero mucho más densos. La temperatura de fusión T_m^7 es 327°C y la temperatura de transición vítrea T_g es -97°C, lo que permite que se pueda utilizar su forma flexible en un intervalo amplio de temperatura.

Es resistente al impacto pero no a la tracción y tiene una elevada resistencia química por lo que se suele utilizar como revestimiento de válvulas y tuberías. [9]



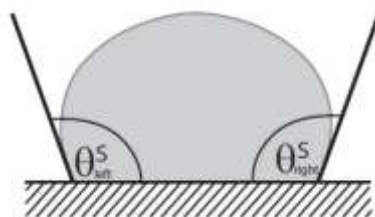
Ilustración 13: Molécula del teflón

2.3. Pruebas y medidas realizadas

2.3.1. Ángulo estático de contacto

Para medir el **ángulo estático** de la gota con cada una de las superficies de estudio se ha utilizado un equipo DSA (Drop Shape Analysis System), en concreto el modelo DSA14 de la casa Krüss GmbH.

El proceso ha consistido en depositar cuidadosamente mediante un cuentagotas una serie de gotas de agua destilada sobre la superficie de cada muestra. Al contactar la gota con la superficie forma 180° hasta que alcanza el equilibrio estático con un ángulo determinado θ . Posteriormente se procede, utilizando el software del equipo, a marcar los puntos de contacto de los ángulos θ derecho e izquierdo de la línea base de la gota, los cuales se quedan registrados en el equipo (ver Ilustración 14). Si la superficie es altamente hidrofílica la gota se esparce por la superficie y no se puede medir el ángulo.



⁷ T_m : Punto de fusión, característico de sólidos cristalinos. Como los polímeros tienen características de material amorfo y cristalino tienen ambos punto; T_m y T_g .

Ilustración 14: Medida de los ángulos estático derecho θ_{der}^s e izquierdo θ_{izq}^s de la gota con la superficie.

Para proporcionar los resultados de cada parámetro a partir de los datos obtenidos de la imagen de la gota, el programa puede utilizar varios métodos de cálculo (que se explican en el apartado 2.4.1), cada uno apropiado para casos distintos. En la *Tabla 2* están presentados los métodos con las principales características que los validan. Como en cada gota se han utilizado al menos dos de esos métodos para hacer la medida, a partir de esta tabla se han seleccionado los resultados obtenidos a fin de no mezclar dichos resultados con métodos no apropiados.

Método de cálculo	Volumen de la gota (μ l)	Ángulo de contacto	Forma de la gota	Superficie del material
Tangente 1	>20	>40°	Regular	Normal
Tangente 2	>20	>40°	Normal	Homogénea
Circular	<20	<40°	Regular	Normal
Altura/Longitud	<20	<40°	Regular	Normal
Gota sésil	>20	>40°	Regular	Normal

Tabla 2: Características de los métodos de cálculo empleados por el equipo DSA14 Krüss.

Los resultados se presentarán en gráficos que relacionan el ángulo de contacto con el volumen de la gota. El ángulo de contacto que aparece es el que resulta de aplicar el método más adecuado, según la Tabla 2, a partir de si el volumen de la gota es mayor o menor a 20 μ l. Asimismo las gráficas permiten ver la relación ángulo-volumen:

- Cuando se han medido 2 o tres gotas para el mismo tratamiento.
- Cuando comparamos gotas con tratamientos diferentes.

Para las medidas se ha utilizado agua destilada; es fácilmente accesible, debido a su alta tensión superficial muestra contactos finitos en muchas superficies, aunque hay que tener cuidado de que esté limpia y no prolongar la medición más de lo necesario. Durante la medida del ángulo de contacto de la gota no se altera el tamaño de ésta, sin embargo, eso no significa que el ángulo permanezca constante con el tiempo ya que en ese tiempo la gota interacciona con la superficie de contacto y con el aire que la envuelve.

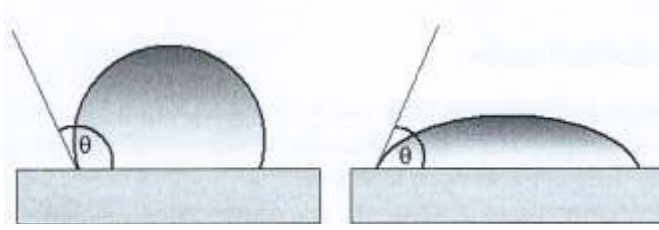


Ilustración 15: Variación de la forma de la gota y del ángulo de contacto justo al depositar la gota y después de 60 segundos [10].

Ejemplos de afectaciones que se dan en este tipo de medida:

- Evaporación de la superficie
- Migración de partículas de la fase sólida a la líquida
- Migración de partículas disueltas del interior de la gota a la superficie
- Reacciones químicas sólido-líquido
- Disolución del sólido por el líquido

Las irregularidades superficiales también pueden influir en la medida del ángulo estático, sea por cambios de textura o presencia de impurezas.

Un sustrato estándar utilizado en este tipo de experimentos ha de estar limpio, ser liso y rígido, químicamente homogéneo e inerte al líquido empleado en los test. Los sustratos empleados en nuestros trabajos, aunque no son ideales, se limpiaron previamente con etanol y manipulados con guantes de silicona. En nuestro caso, la placa de mortero no consigue esta regularidad superficial, lo que ha dificultado algunas medidas.

2.3.2. Variación de la pendiente de deslizamiento. Histéresis

Otro de los objetivos de este trabajo es estudiar si varía la pendiente de deslizamiento (Ilustración 16). Si se encuentra que al aplicar un tratamiento la gota desliza a menor pendiente entenderemos que mejora la situación de partida puesto que se reduciría la pendiente manteniendo la capacidad de evacuación del agua en la tubería.

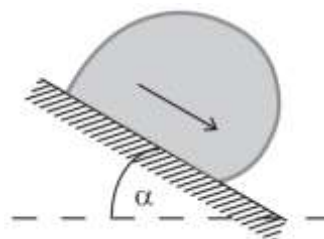


Ilustración 16: Esquema de una gota rodando sobre una superficie inclinada. El ángulo indicado es el alcanzado antes de que la gota inicie el movimiento.

Se ha medido la pendiente a partir de la cual la gota de agua comienza a deslizarse por la superficie de cada material y de una tubería de PVC. Como se ha explicado, en superficies hidrófobas (estado de Cassie-Baxter) se puede dar el caso de que la gota no se deslice, sino que “ruede” por la superficie. Para ello se ha utilizado un plano inclinado sobre cuya plataforma se ha colocado cada muestra de material y se ha depositado una gota de agua, tanto destilada como carbonatada⁸, de unos 0.05ml en el extremo superior. De forma continua se ha ido aumentando la pendiente hasta ver la gota desplazarse.

Histéresis

Como se ha explicado en el apartado 1.2.2.3, la histéresis H se calcula a partir de los ángulos de avance y retroceso de la gota en horizontal y en pendiente. En nuestro trabajo, para calcularla de forma gráfica, se ha utilizado la imagen obtenida en el momento del deslizamiento de la gota sobre los materiales de estudio.

El proceso de estas medidas se puede ver en las ilustraciones siguientes y consiste en colocar la fotografía de forma que el plano por el que desliza la gota quede horizontal, trazar las tangentes del ángulo de contacto y superponerlas en el transportador de ángulos. Aunque las medidas realizadas se consultan ver en el anexo 8.1, se indica a continuación el caso del PVC como ejemplo:

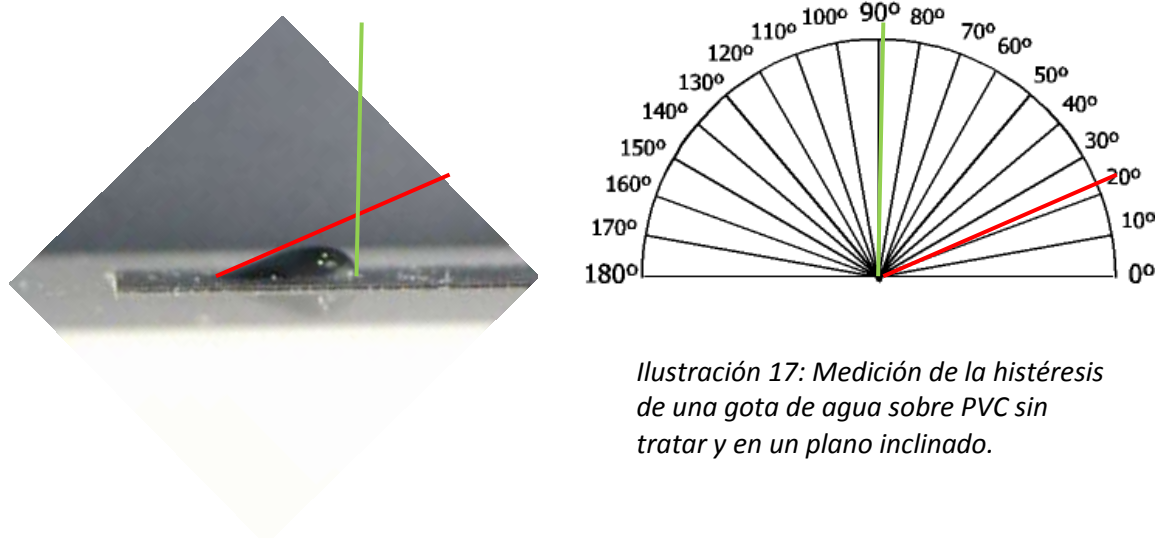


Ilustración 17: Medición de la histéresis de una gota de agua sobre PVC sin tratar y en un plano inclinado.

- Superficie de PVC sin tratar:
 - $\theta_a^s = 180 - 90^\circ \pm 5^\circ = 90^\circ \pm 5^\circ$
 - $\theta_r^s = 24^\circ \pm 5^\circ$

⁸ El agua ha estado 25 días en contacto con mortero de cemento portland

$$\circ H = \theta_a^s - \theta_r^s = (90^\circ \pm 5^\circ) - (24^\circ \pm 5^\circ) = 66^\circ \pm 5$$

2.3.3. Auto-limpieza

Otro de los objetivos específicos de este trabajo es estudiar de forma cualitativa la auto-limpieza de las superficies a fin de ver si con los nano-tratamientos se reduce la sedimentación de material y el agua consigue “arrastrar” el sedimento que haya quedado adherido en la superficie. Esto es trascendental para reducir el coste de mantenimiento de las instalaciones de saneamiento.



Imagen 4: Equipo utilizado para autolimpieza

Para estudiar esta propiedad se han empleado muestras de PVC similares a las utilizadas en los otros tratamientos y también segmentos de tubería comercial de PVC, cortados longitudinalmente por la mitad para facilitar la aplicación de los tratamientos y comprobar los efectos de la autolimpieza.

Cada elemento a estudiar (muestras y tubería) ha estado en remojo en agua carbonatada entre 2 y 4 días y posteriormente secado al aire libre, de forma que el CaCO_3 disuelto en el agua se ha depositado en la superficie. Cada elemento se ha colocado sobre el plano inclinado y se ha ido dejando caer sobre él gotas de agua destilada, mediante un cuentagotas, a una velocidad de constante.

Se ha realizado este experimento para dos inclinaciones; del 2% y del 23%.

Aun siendo éste un proceso sencillo, se han de tener en cuenta factores como:

- El cuidado durante el almacenaje y la manipulación del material a ensayar, de forma que no se ensuciaran ni antes ni después de aplicar los tratamientos.
- El tamaño equivalente de las gotas, puesto que el volumen influye en los resultados.
- La utilización de agua destilada y agua carbonatada por separado.
- La variación continua y uniforme de la inclinación.

- La utilización del mismo caudal de agua destilada y pendiente durante las pruebas de autolimpieza de cada tratamiento.

2.4. Equipos utilizados

2.4.1. Medidor de ángulo de contacto

El medidor de ángulo de contacto es un sistema de análisis DSA14 (ver anexo 7.3) de la casa KRÜSS. Está formado por un equipo de toma de imágenes conectado a un PC equipado con un software que interpreta las imágenes tomadas y realiza las operaciones de ajuste de forma y medida de ángulo. El material o la superficie a caracterizar se colocan sobre la plataforma, donde se deposita una gota, en un extremo se sitúa un foco de luz, mientras que en el otro se sitúa la cámara de video. La imagen obtenida corresponde a una imagen negra u oscura que corresponde con la gota con fondo blanco.



Imagen 5: Medidor de gotas Krüss DSA14. Se aprecia la plataforma, la cámara y la pantalla retro-iluminada.

El software de interpretación de la imagen utiliza diferentes métodos de cálculo para obtener el ángulo de contacto y el volumen de la gota [10].

Métodos de aproximación empleados:

- **Método 1 de la tangente:** El perímetro de la gota es adaptado a la ecuación general de una sección cónica. La derivada de esta ecuación proporciona la pendiente en el punto de contacto de las tres fases y de aquí el ángulo de contacto.
- **Método 2 de la tangente:** La zona de la línea base de la gota se adapta a una función polinómica. A partir de los parámetros adaptados se obtiene la pendiente. *Cómo sólo tiene en cuenta la línea base, este método se ve afectado por las distorsiones en la base debida a impurezas o superficies*

irregulares y además necesita una excelente imagen en la zona de contacto. Sirve para medir ángulos dinámicos.

- **Método H/W, altura-longitud:** En este método se asume que el ángulo de contacto para gotas pequeñas no está afectado por el tamaño total de la gota. A partir de los puntos de altura y longitud máximas de la gota se puede obtener el ángulo de contacto. *Cuanto más pequeña sea la gota, más ajustado es el resultado, además necesita que la forma de la base sea homogénea ya que el ángulo obtenido es el mismo para los lados de la gota.*
- **Método del segmento circular:** Este método es adecuado para ángulos de contacto pequeños ($<30^\circ$). El área que forma la gota se adapta a un segmento circular. De esta manera todo el perímetro se puede estudiar y no sólo la zona de contacto de la gota. *Tiene las mismas condiciones que el método altura-longitud, solo que con menos distorsiones en el resultado.*
- **Método de la gota sésil o método de Young-Laplace:** El área que forma la gota se puede describir adaptándola a la ecuación de Young-Laplace para áreas envolventes curvas. *Es el método más complicado pero teóricamente el más exacto. Como supone que la forma de la gota es simétrica, no se puede utilizar para medidas de ángulos de contacto dinámico ni $<30^\circ$.*

Cuando la forma de la gota no ha permitido que alguno de los métodos de aproximación se ajuste suficientemente a los perfiles teóricos se ha tomado una fotografía y se han medido de forma gráfica tanto la histéresis como el ángulo de contacto (Imagen 6).



Imagen 6: Fotografía de una gota sobre la placa tratada con Lotusan, el software del equipo de medida no podía dar precisión. En este caso, la línea de aproximación no se adapta a la forma de la gota (flechas) para el método Tangente 2 y el resultado sería $\theta=70.7\pm17.12$ grados. Al medirlo en el apartado 8.2 tenemos que $\theta\approx62^\circ$.

2.4.2. Plano inclinado

El plano inclinado (*Imagen 7*) se ha utilizado para medir a la pendiente a la que las gotas deslizan por las superficies tratadas. La plataforma se eleva gradualmente de forma manual hasta que las gotas deslizan y se anota la pendiente correspondiente.

Este equipo también se ha utilizado para medir la autolimpieza, colocando la muestra o la tubería en la plataforma a una determinada inclinación y dejando caer sobre ella el agua con un cuentagotas.

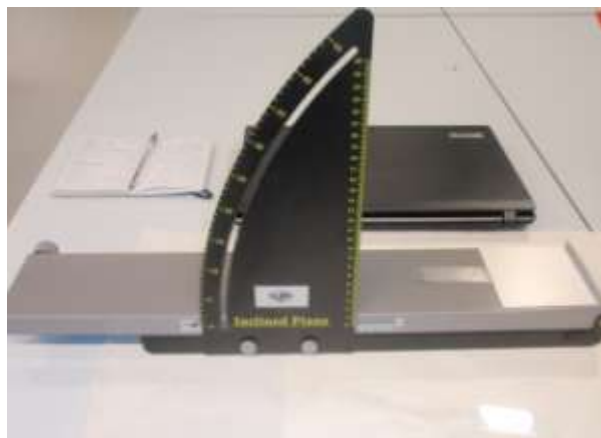


Imagen 7: Plano inclinado utilizado en la medición del deslizamiento y la autolimpieza

2.4.3. Equipo de plasma de corona

El equipo utilizado (*Imagen 8*) consiste en un sistema de plasma no térmico a presión atmosférica. Estos equipos se usan generalmente para limpiar superficies o para aumentar la imprimabilidad y mojabilidad de superficies tanto en plásticos como en la industria textil.

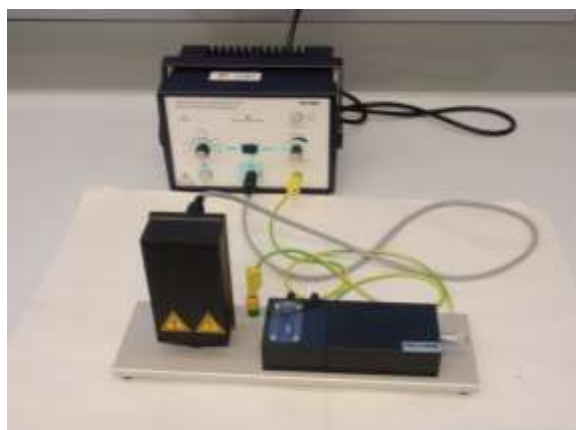


Imagen 8: Equipo de plasma de corona, empleado para aumentar la hidrofiliidad de las superficies.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se detallan y discuten los resultados obtenidos en las diferentes medidas de los experimentos.

En las tablas del anexo 8.4 se presentan las mediciones realizadas, los métodos de aproximación utilizados y las medias de volumen y de θ para cada material. Veremos que con los tratamientos hidrofóbicos el ángulo de contacto θ aumenta y con los hidrofílicos disminuye.

Las pruebas se han realizado sobre láminas rectangulares de cada material, de 60x20mm (aproximadamente) y tramos de tubería de PVC comercial de diámetro 90mm y 400mm de longitud. En el caso del mortero ha habido dos tipos de muestras:

- Dos placas de mortero de 200x200x50mm revestidas en laboratorio con los nanotratamientos.
- Una placa cartón-piedra revestida de mortero de 200x150x5mm, fabricada y revestida *en origen* de Sto Lotusan.

3.1. Ángulo de contacto en plano horizontal

3.1.1. Introducción

Dentro de las medidas de cada gota, hay una diferencia en los cálculos según qué método se emplee. Como esta diferencia es muy pequeña, se han calculado las medias del volumen y del ángulo de contacto a partir del método más apropiado a las características de cada gota (*Tabla 2*) según se indica en la descripción de cada método en el apartado 2.4.1:

- Para las gotas con volumen < 20 μl se muestran la media de los resultados de los métodos Circle y H/W.
- Para las gotas volumen > 20 μl se muestran la media de los resultados de los métodos Tangent 1, Tangent 2, y Sessile.

En el caso de las placas de mortero, no se han podido tomar todas las medidas de θ previstas debido a las características geométricas de la placa, la irregularidad superficial y el peso.

3.1.2. Experimentación y análisis de resultados

Observando las formas de las gotas en la Imagen 9 se puede decir si los tratamientos aplicados sobre la superficie han sido de tipo hidrófilo o hidrófobo.



*Imagen 9: i) Primera fila (siempre de izquierda a derecha), tres gotas sobre **PVC**; sin tratamiento, Nanotool y plasma 30''. ii) Segunda fila, cuatro gotas sobre **cobre**; sin tratamiento, Nanotool, plasma 30'', ác. esteárico+nitrato de plata. iii) Tercera fila, cuatro gotas sobre **aluminio**: sin tratamiento, Nanotool, plasma 60'', ác. esteárico+nitrato de plata. iv) Cuatro gotas sobre **teflón**; sin tratamiento, plasma 20'', 30'' y 60''.*

Estudios sobre la histéresis como el de Boris Krasovitski and Abraham Marmur [11] demuestran que el volumen de la gota influye en el ángulo de contacto con la superficie θ . En nuestro caso, en cada material se ha estudiado someramente cómo afecta el volumen a θ (Gráfico 1) y tenemos que la variación no sobrepasa los 20° , esté o no esté la superficie tratada. Para poder analizarlo en profundidad y determinar criterios de comportamiento habría que haber tomado muchas más medidas de gotas y controlado las condiciones de contorno.

Como se ha explicado en el apartado anterior, se han utilizado las aproximaciones Tan1, Tan2 y Sessile para gotas $V > 20\mu\text{l}$ y para gotas $V < 20\mu\text{l}$ el H/W y el Circular (en las gráficas se ha marcado la línea de $20\mu\text{l}$ para resaltar este criterio). Se puede comprobar que, en general, cuando los volúmenes de las gotas son similares los resultados de las aproximaciones también. Una excepción la tenemos en el PVC sin tratamiento y con la aplicación de Nanotool.

En el Gráfico 1, tenemos a la izquierda los dos materiales con $\theta < 90^\circ$, por tanto de carácter hidrófilo (ver Tabla 1) y a la derecha los materiales con $\theta > 90^\circ$, por tanto superficie de carácter hidrófobo.

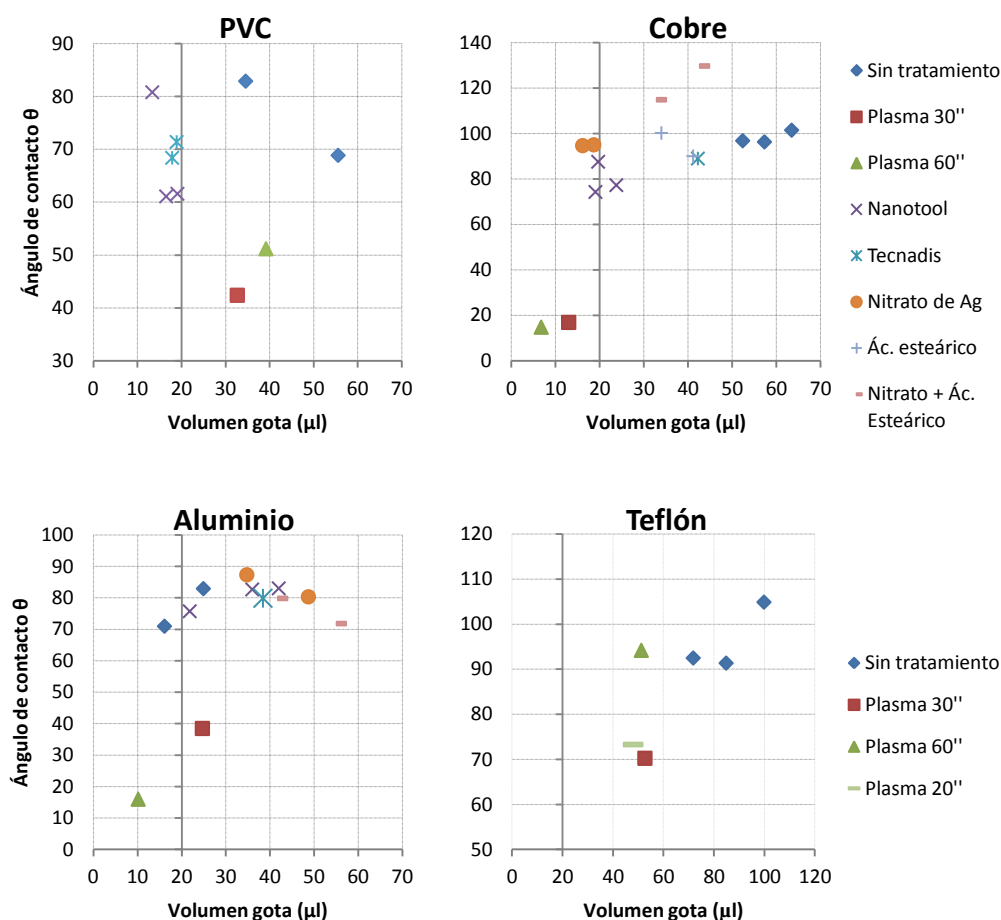


Gráfico 1: Relación θ -vol de cada superficie con los distintos tipos de tratamientos.

En el estudio del PVC se han empleado láminas y muestras procedentes de piezas comerciales. Para poder contrastar los resultados de los tratamientos en las láminas de laboratorio con piezas idénticas a las tuberías, se han aplicado a éstas los tratamientos superficiales Nanotool y Tecnadís Performance. El plasma no se pudo aplicar a las muestras comerciales debido a que el equipo no se adaptaba a la geometría de las piezas.

Tratamiento		θ medio (grados)		
		PVC lámina	PVC muestra	Abs (lámina-muestra)
1	Ninguno	75,9		
6	Nanotool	67,8	76,8	9,0
7	Tecnadis	69,9	74,7	4,8

Tabla 3: Diferencia en la media del ángulo de contacto de las gotas medidas en la lámina o la muestra de PVC.

En el Gráfico 2 podemos ver que sobre el PVC los valores de θ , en función del método de aproximación utilizado, siguen un patrón similar. Además en la

Tabla 3, vemos que si consideramos la media de los valores de θ las diferencias son menores de 10 grados.

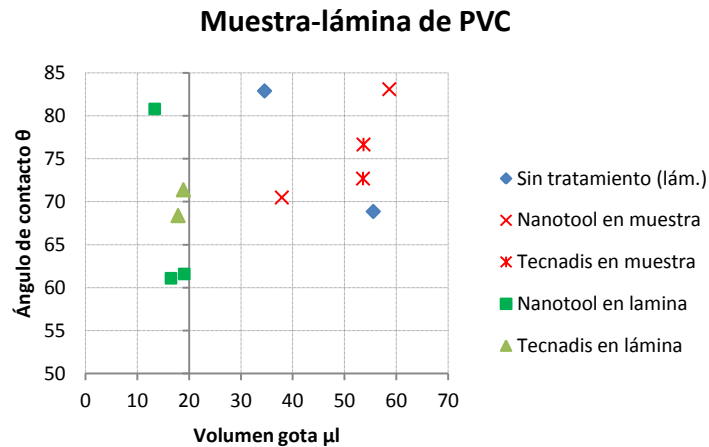


Gráfico 2: Diferencias de resultados en la lámina y la muestra de PVC para las aplicaciones superficiales Nanotool y Tecnadis

En general ni los nano-tratamientos, ni el ácido esteárico, ni el nitrato de plata han producido grandes diferencias en la forma de cómo contacta la gota con la superficie, es decir, no varía mucho θ (Tabla 4) y se mantiene en valores cercanos a los de la superficie sin tratamiento superficial. En cambio, esto no ocurre al aplicar el plasma o el nitrato de Ag con el ácido esteárico, se aprecian variaciones notables dependiendo del material de soporte.



Imagen 10: Fotografías de la placa que se ha tratado superficialmente en el laboratorio con Tecnadis Protect y Tecnadis Effect. A la izquierda la placa con la superficie curada al aire libre con la mancha de agua después de ser absorbida. A la derecha la placa curada en molde.

En el mortero se dan dos tipos de superficies según cómo ha sido el proceso de curado; (ver Imagen 10)

- i. Expuesto a la intemperie: La gota en la zona sin tratamiento es absorbida y las gotas sobre el nano-tratamiento se mantienen sin cambios.

- ii. En contacto con el molde: La gota en la zona sin tratamiento es absorbida continua y lentamente (este es el caso también de la placa de Lotusan.). Las gotas sobre el nano-tratamiento se mantienen.

Tratamiento		Ángulo de contacto medio según materiales				
		PVC	Cobre	Aluminio	Teflón	Mortero
1	Ninguno	75,9	98,2	77,0	96,3	
2	Plasma 20"				73,3	
2	Plasma 30"	42,4	16,9	38,5	70,3	
2	Plasma 60"	51,2	14,8	16,0	94,2	
3	Nitrato Ag		94,9	83,9		
4	Ác. Estearico		95,2			
5	NO ₃ Ag + C ₁₈ H ₃₆ O ₂		122,3	75,9		
6	Nanotool	67,8	79,7	80,5		
7	Tecnadis	74,7	89,0	79,9		94
8	Lotusan*					60,2

Tabla 4: Comparación del ángulo de contacto medio entre materiales, según el tratamiento aplicado al soporte (*placa de la muestra de fábrica).

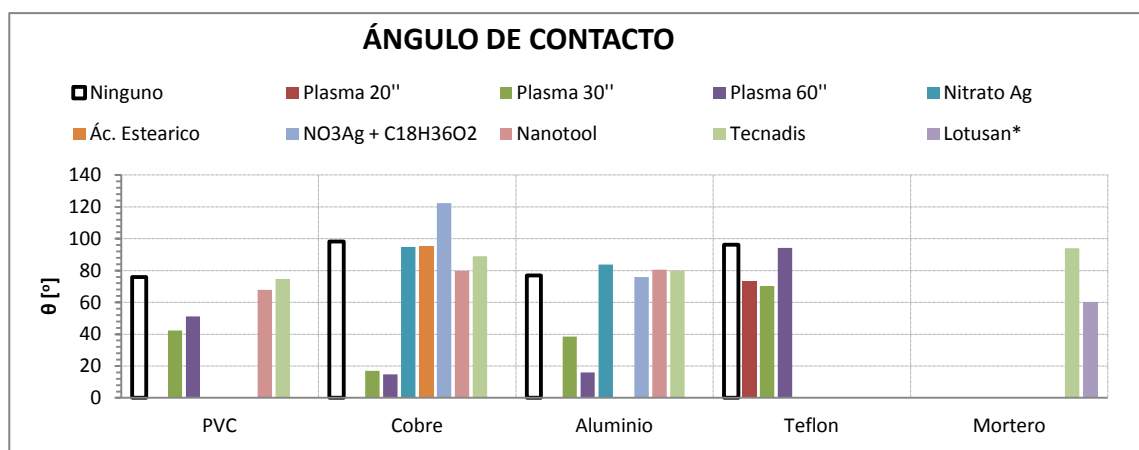


Gráfico 3: Comparación de θ por materiales y tratamientos superficiales.

En el caso del plasma, las superficies tratadas se vuelven hidrófilas en todos los materiales, excepto el teflón. En los metales, este efecto hidrófilo es muy grande, pasando de valores θ del orden de 80-100 grados (con superficie limpia) grados a 20-40 grados. También en los metales, el plasma aplicado durante 60'' aumenta más las propiedades hidrófilas de la superficie que el de 30''. En el caso del cobre se pueden apreciar muy bien estos cambios en la Imagen 11.





Imagen 11: Seis gotas con diferentes tratamientos superficiales en el cobre. Fila superior, de izquierda a derecha; sin tratamiento, plasma de arco 60'' y nitrato de plata. Fila inferior, de izquierda a derecha; con ácido esteárico, con nitrato de Ag + ácido esteárico y con Nanotool.

En los polímeros, el aumento de la mojabilidad es menor, pasando el ángulo de contacto θ de 75° (superficie limpia) a 40° - 50° grados en el PVC y en el teflón de 90° grados a 70° - 90° . Además, el efecto de aplicar el plasma más o menos tiempo produce el efecto inverso que en los metales; el de 60'' recupera la hidrofobicidad de la superficie, particularmente la del teflón que se recupera totalmente.

3.1.3. Conclusiones

- Para un mismo material y tratamiento superficial, si los volúmenes de las gotas son similares, los ángulos de contacto de las gotas con la superficie también lo son.
- En los polímeros, el tratamiento de plasma a 60'', aun siendo un tratamiento que aumenta la mojabilidad, devuelve hidrofobicidad a la superficie.
- Los tratamientos superficiales hidrófobos Nanotool y Tecnadis no aumentan el ángulo de contacto de la gota con la superficie.
- El ácido esteárico y el nitrato de plata no aumentan el ángulo de contacto de la gota con la superficie en el cobre ni en el aluminio. Al actuar conjuntamente sobre el cobre sí que θ aumenta notablemente, llegando al nivel de ultra-hidrofobicidad.
- En el mortero, los tratamientos hidrófobos impiden que el agua sea absorbida por el mortero.

3.2. Pruebas en plano inclinado

3.2.1. Introducción

Los resultados del experimento se recogen en las

Tabla 5, *Tabla 6* y *Tabla 7* que relacionan las pendientes de inclinación de la base sin y con tratamiento superficial y cómo afecta a la pendiente que la gota sea de agua destilada limpia o de agua carbonatada.

Con la toma de imágenes se ha podido medir la histéresis de algunas gotas justo en antes de deslizar o “rodar” por el plano inclinado.

3.2.2. Experimentación y análisis de resultados

Además de los resultados, en las tablas se indica además si la gota es de agua destilada limpia (cabecera en azul) o carbonatada (cabecera en color beige). En las tablas comparativas, si la pendiente se reduce al aplicar algún tratamiento, esta variación es en valor negativo y en color azul.

Material	Tipo	Inclinación del plano de apoyo (en grados)									
		limpio	nanotool	tecnadis P	tecnadis E	sto	limpio	nanotool	tecnadis P	tecnadis E	sto
PVC	Muestra	57	24	22			42	26	25		
Aluminio	Muestra	35	38	26			48	43	21		
Cobre	Muestra	24	28	29			30	27	13		
Mortero	superficie			30	30						
Mortero	Molde	15		22	28	23					27
PVC	Tubería	63	34	23			40	35	27		

Tabla 5: Ángulo de deslizamiento de una gota de agua destilada (cabecera en azul) y de agua carbonatada (cabecera en marrón).

Material	tipo	Variación de la pendiente (%)							
		nanotool	tecnadis P	Tecnadis E	sto	nanotool	Tecnadis P	Tecnadis E	sto
PVC	muestra	-58%	-61%			-38%	-40%		
Aluminio	muestra	9%	-26%			-10%	-56%		
Cobre	muestra	17%	21%			-10%	-57%		
Mortero	superficie	no	no			no	no		
Mortero	molde	no	47%	87%	53%	no	no		80%*
PVC	tubería	-46%	-63%			-13%	-33%		

Tabla 6: Variación de las pendientes en número de grados con respecto al original, al comparar las pendientes de deslizamiento entre superficies tratadas y no tratadas (cifras en azul cuando la pendiente se reduce).

**(calculado respecto a la pendiente sin tratamiento y gota de agua limpia)*

tipo	Pendiente H2O limpia – Pendiente H2O carbonatada		
	Soporte original	Soporte con Nanotool	Soporte con Tecnadis P
muestra	-15	0	3
tubería	-23	0	4

Tabla 7: Variación de las pendientes en grados, al utilizar una gota de agua destilada o carbonatada, en superficies tratadas y no tratadas (cifras en azul cuando la pendiente se reduce).

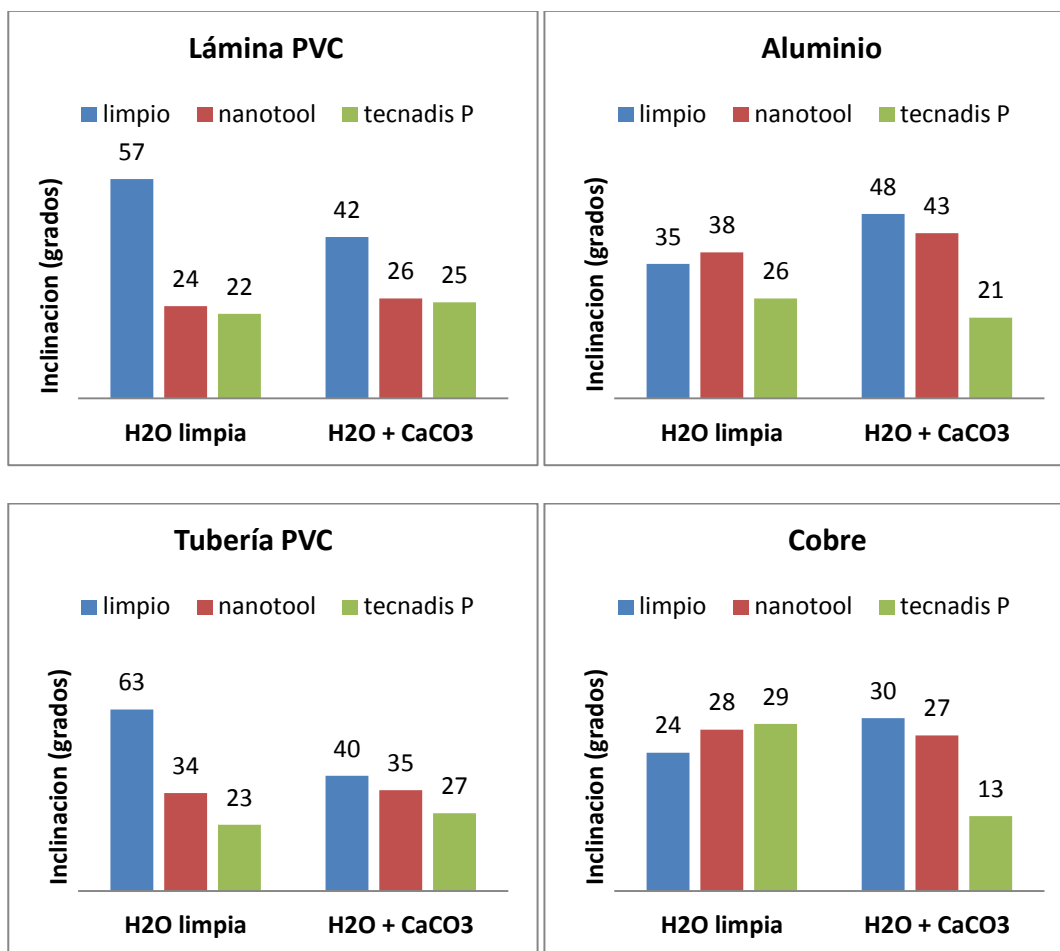


Gráfico 4: Grados de inclinación de deslizamiento para cada material con una gota de agua destilada limpia o carbonatada.

Las diferencias de las pendientes se observan bien en las tablas comparativas y en las barras del *Gráfico 4* vemos que en el PVC todos los resultados son positivos⁹, es decir, se reducen las pendientes de deslizamiento en un porcentaje del 44% como mínimo y, en el mejor de los casos, pasando de una inclinación de deslizamiento de 63°, en la superficie sin tratar de la tubería, a 35° en la tubería tratada con Tecnadis P.

En la secuencia de fotografías de la Imagen 12 vemos las diferencias de los planos de inclinación de deslizamiento mínimo de la gota sobre PVC.

⁹ Una reducción de la pendiente (valor <0) se considera que es positiva desde un punto de vista cualitativo porque es uno de los objetivos buscados con la aplicación de estos materiales.

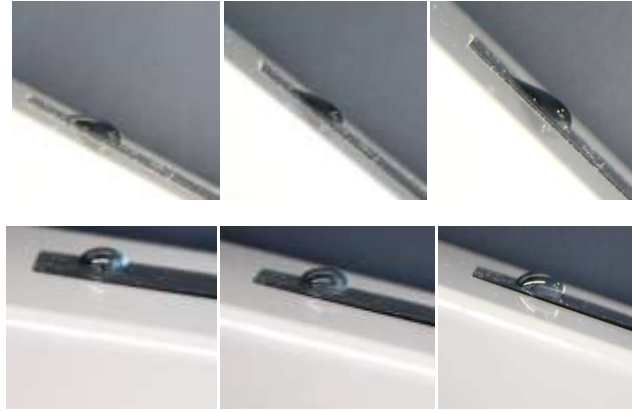


Imagen 12: Secuencia de fotogramas del aumento de la pendiente hasta el momento que se produce el deslizamiento. En la hilera superior, con la superficie de PVC sin tratar, y en la inferior, con la superficie de PVC tratada con Tecnadis P.

En los metales, el comportamiento es diferente según el tratamiento aplicado y el tipo de agua de la gota. En el caso del cobre, solamente con la gota de agua carbonatada y aplicando Tecnadis se consigue reducir la pendiente, unos 11° (un 46%) con agua carbonatada y si lo hacemos con agua limpia la pendiente aumenta unos 5° (un 13%). Con el aluminio, al aplicar Tecnadis se reduce la pendiente, independientemente del agua utilizada, entre 9° y 14° , esto es, un 26% y un 40%.

En la Imagen 13 vemos la secuencia de imágenes del experimento realizado sobre las láminas de aluminio.



Imagen 13: En esta serie de fotografías se puede apreciar cuándo desliza la gota sobre Al, según el tratamiento recibido. La imagen más cercana no tiene tratamiento, la central tiene Nanotool y la más lejana Tecnadis P.

En la superficie no tratada de la placa de mortero la gota es absorbida más o menos rápido, según si el curado de la superficie de deslizamiento ha sido con la superficie expuesta al aire libre o en molde. En este caso, si la gota se prueba sobre las superficies tratadas con Tecnadis P o Tecnadis E no empapa, la gota no desliza sino que rueda y la inclinación de deslizamiento es de 22°-28°. En la superficie sin tratar la inclinación es 15° (Gráfico 5).

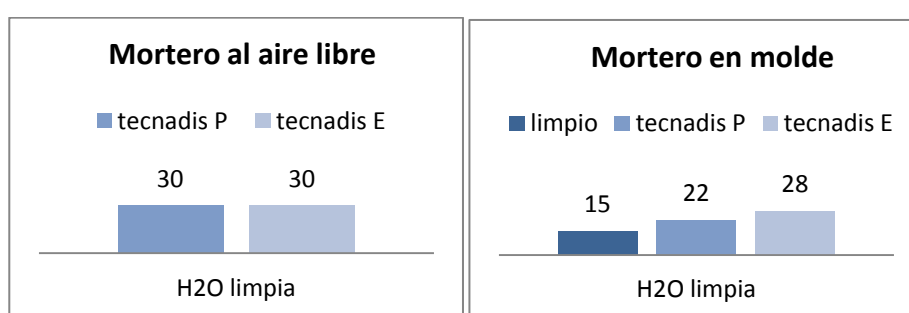


Gráfico 5: Izquierda. Pendientes para el mortero con la superficie curada al aire libre. No aparece el ángulo con la superficie sin tratar porque la gota queda absorbida instantáneamente. Derecha. Ídem curada en molde.

Donde sí que influyen los tratamientos aplicados es en la velocidad de desplazamiento de la gota. Al reducir el contacto gota-superficie y al colchón de aire sobre el que se apoya la gota (hidrofobicidad), ésta se desplaza a más velocidad.

Histéresis

Durante este experimento se ha podido ver la diferencia del comportamiento mecánico de la gota de agua según era la superficie por la que se desplazaba. A partir de las fotografías tomadas también se ha podido calcular la histéresis H de forma gráfica (ver apartado 8.1) en el momento del deslizamiento.

Para el PVC se tienen los valores:

- En la tubería sin tratamiento: $H = 66^\circ \pm 5^\circ$
- En la tubería tratada: $H = 49^\circ \pm 5^\circ$

Es lógico que haya diferencia porque la histéresis es reflejo de la homogeneidad y rugosidad de la superficie. En la tubería sin tratar, en el instante de comenzar a

moverse, al haber más puntos de contacto con la superficie, aumenta la tensión superficial sobre la gota que rompe y desliza; en cambio, en las superficies tratadas, la gota ha rodado.

También se ha podido fotografiar la gota de agua sobre la superficie de la lámina de cobre en el momento cercano al deslizamiento. Se ha comprobado que con la superficie tratada o sin tratar la histéresis medida es la misma, lo que nos viene a decir que el tratamiento apenas afecta a la textura superficial del cobre:

- En la tubería sin y con tratamiento: $H = 47^\circ \pm 5^\circ$

3.2.3. Conclusiones

- En el PVC, los tratamientos reducen notablemente la pendiente de deslizamiento, aunque estén pensados para materiales porosos o poco porosos.
- En los metales, si la gota es de agua carbonatada, los tratamientos también reducen la pendiente de deslizamiento.
- En los metales, si la gota es de agua limpia, sólo con Tecnadis se reduce la pendiente de deslizamiento.
- En el mortero, al contrario que en los metales y polímeros estudiados, la pendiente de deslizamiento aumenta en la superficie tratada.
- Los tratamientos hacen que las superficies se inhiban del tipo de agua empleada en la gota. Esto es así sobretodo en el Tecnadis.
- Sobre las superficies tratadas, la gota se desplaza rodando. Si no está tratada, la gota tiene una histéresis mayor al iniciar el movimiento, se rompe y desliza (no rueda) a menor velocidad.
- En el mortero la gota depositada sobre las zonas no tratadas empapa la superficie y apenas se desliza.

3.3. Pruebas cualitativas de Auto-limpieza

3.3.1. Introducción

Con este experimento se intenta comprobar el efecto de la autolimpieza del carbonato cálcico (proveniente del CaO del mortero de cemento en contacto con el CO₂ del aire) adherido a la superficie de PVC.

3.3.2. Experimentación y análisis de resultados

Para esta comprobación se han utilizado muestras de PVC y segmentos de tubería de comercial; dos piezas de cada tipo se han revestido de Nanotool y Tecnadis P y una tercera se ha dejado sin tratar. Posteriormente, todo se ha depositado en un

recipiente de agua carbonatada hasta que, al evaporarse el agua, el CaCO_3 ha quedado adherido a la superficie de la tubería de PVC.

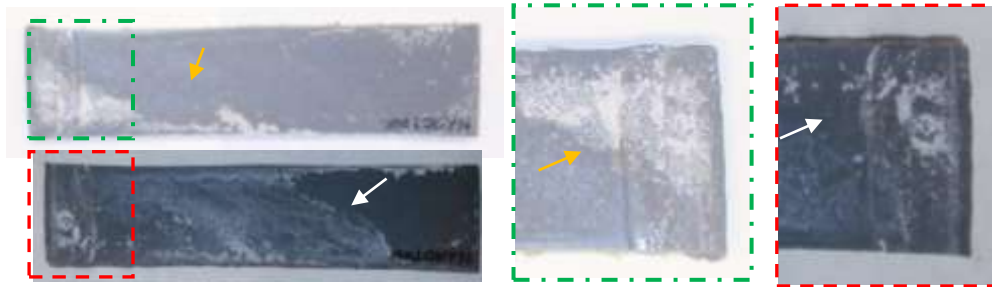


Imagen 14: Placa de PVC con Nanotool antes (arriba) y después (abajo). En la zona ampliada (flecha) se ven los puntos donde se ha desprendido el CaCO_3 y en el cuerpo de la placa inferior se aprecia la zona “lavada” donde se ha depositado el carbonato proveniente del agua que ha circulado por la placa. Sentido del agua; de izquierda a derecha.

En ambas superficies con tratamiento se ha producido un cierto grado de auto-limpieza de dos maneras:

- I) Desprendimiento de la placa carbonatada en la zona de impacto de la gota.
- ii) Lavado de la zona central de la placa por donde ha circulado el agua. En la placa sin tratamiento el agua no ha producido ningún cambio en la superficie.

Durante la “carbonatación” de las superficies de las tuberías, la que no ha tenido tratamiento se ha mojado y carbonatado de forma más o menos homogénea, es decir, se ha creado una superficie carbonatada ancha en el fondo de la tubería. En las zonas tratadas sólo ha sedimentado y se ha adherido el CaCO_3 en forma de filamentos, allí donde más se se ha concentrado.

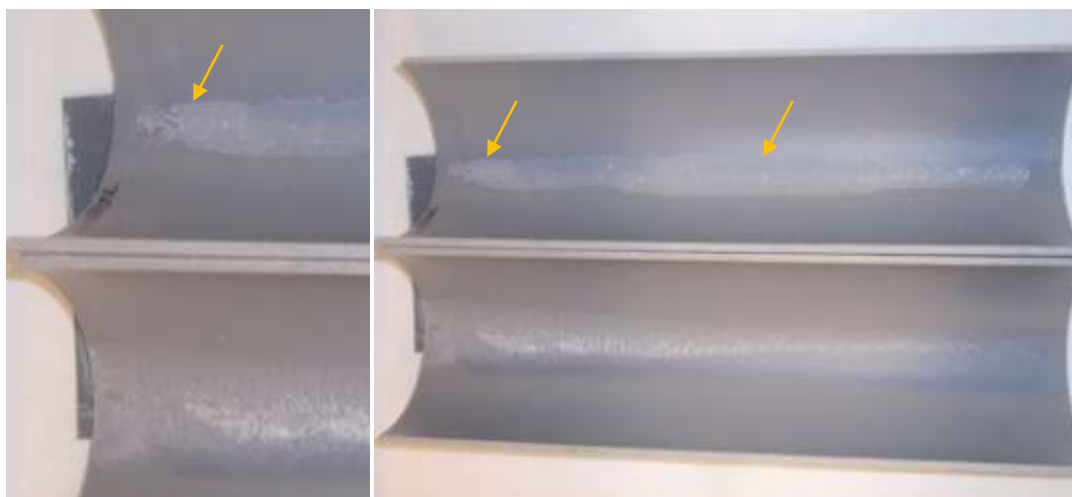


Imagen 15: Segmento de tubería tratada con Nanotool (arriba) en la que se indica con flechas la zona lavada central y la zona donde se ha desprendido el CaCO_3 (ampliación). En el segmento sin tratamiento (abajo) el sedimento no ha sufrido cambios. Sentido del agua: de izquierda a derecha.

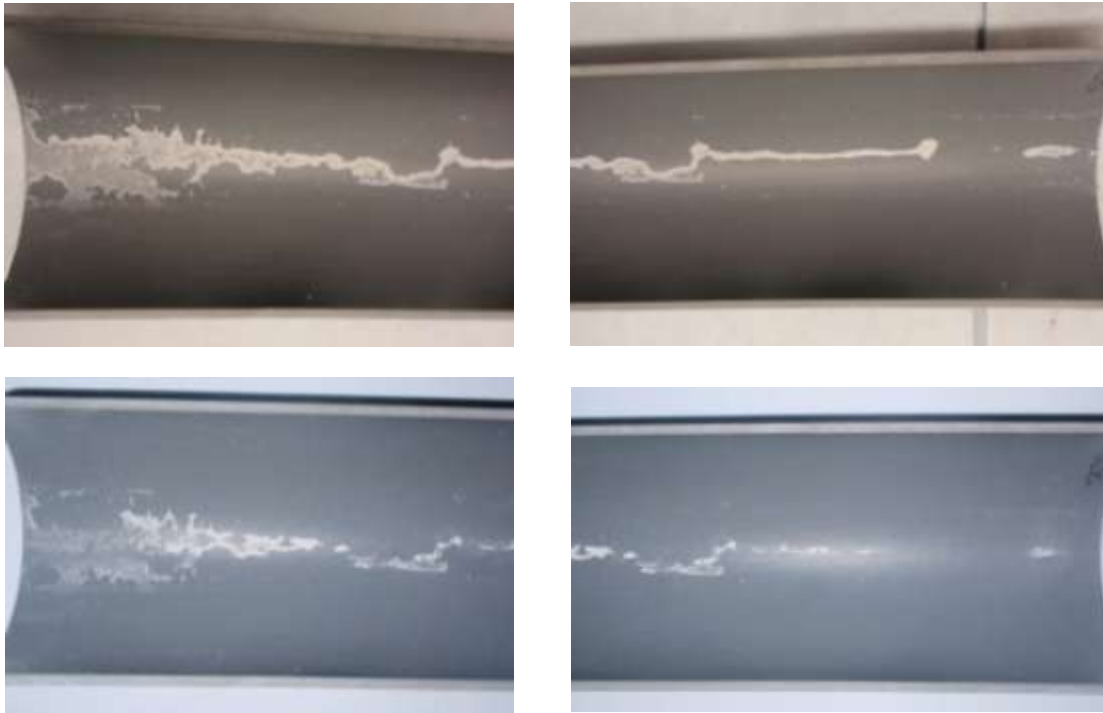


Imagen 16: Fotografías de la tubería tratada con Tecnadis antes (arriba) y después (debajo) del proceso de lavado. Se aprecia claramente la zona lavada (izquierda) por el impacto de la gota y las zonas lavadas en el tramo central y final (derecha). Sentido del agua; de izquierda a derecha.

En las tuberías con tratamiento hidrófobo (Imagen 15) el efecto ha sido el mismo que con las muestras; allí donde cae la gota se desprende el carbonato cálcico y por donde discurre el agua se disuelve el carbonato dejando una parte sin disolver en forma de mancha blanquecina. En el tratamiento con Tecnadis el efecto de autolimpieza ha sido más importante (Imagen 16). En el segmento sin tratar no hay cambios.

Con este experimento hemos podido ver que la autolimpieza se produce sin embargo no hemos la cuantificado. Una forma de hacerlo sería analizando el agua antes y después de circular por la tubería mediante el análisis de sales solubles (UNE 103205:2006)

3.3.3. Conclusiones

- Los tratamientos hidrófobos aplicados resultan efectivos desde el punto de vista de la auto-limpieza, más con Tecnadis.

- Se han podido comprobar dos procesos de auto-limpieza, uno por impacto al golpear la gota contra la superficie y otro al disolverse el material en el recorrido del agua.
- Los tratamientos ayudan a que no se adhiera a la tubería de CaCO_3 disuelto en el agua.

4. VALORACIÓN ECONÓMICA

A modo informativo se hace una valoración económica del trabajo, incluyendo en este capítulo los listados de:

- Actividades incluidas en el presupuesto
- Resumen por actividades
- Resumen por capítulos

Los precios unitarios y la justificación de los precios de las actividades están como anexos.

La distribución en tiempo ha sido:

- Manipulación de los materiales así como experimentación y toma de resultados en laboratorio: 202 horas
- Análisis de resultados y redacción del proyecto: 129 horas
- Total 331 horas

4.1. Actividades valoradas

Tabla con el listado de actividades realizadas incluidas en el presupuesto.

Ref	Ud	Actividad
1		Previos
1.1	Ud	Selección y suministro de nano-tratamientos para los ensayos en PVC, incluyendo el transporte del material.
1.2	Ud	Selección y suministro de nano-tratamientos para los ensayos en metales, incluyendo el transporte del material.
1.3	Ud	Suministro de muestras para los ensayos de metales (aluminio y cobre) y polímeros (PVC y teflón)
2		Preparación de muestras y experimentación en laboratorio
2.1	H	Preparación de todo tipo de muestras mediante corte manual en diferentes tamaños, limpieza con etanol o agua destilada y todas las operaciones necesarias para dejar las piezas preparadas para ser utilizadas.
2.2	Ud	Medida del ángulo de contacto
2.3	Ud	Aplicación de nanotratamiento sobre muestras metálicas
2.4	Ud	Aplicación de nanotratamiento sobre muestras PVC y mortero
2.5	Ud	Aplicación de tratamiento de plasma sobre todo tipo de muestras
2.6	Ud	Medida del ángulo de plano inclinado
2.7	Ud	Comprobación auto-limpieza

2.7	Ud	Toma de datos y resultados de los experimentos
3		Análisis de resultados y redacción de proyecto
3.1	H	Análisis técnico de resultados de los ensayos en oficina técnica y redacción del proyecto, incluyendo borradores y versiones definitivas, originales y copias.

Tabla 8: Listado de actividades presupuestadas

4.2. Resumen por actividades

Ref	Ud	Actividad	€/ud	Núm	€
1		Previos			
1.1	Ud	Selección y suministro de nano-tratamientos para los ensayos en PVC, incluyendo el transporte del material.	165,00 €	1	165,00 €
1.2	Ud	Selección y suministro de nano-tratamientos para los ensayos en metales, incluyendo el transporte del material.	103,50 €	1	103,50 €
1.3	Ud	Suministro de muestras para los ensayos de metales (aluminio y cobre) y polímeros (PVC y teflón)	82,75 €	1	82,75 €
2		Preparación de muestras y experimentación en laboratorio			
2.1	h	Preparación de todo tipo de muestras mediante corte manual en diferentes tamaños, limpieza con etanol o agua destilada y todas las operaciones necesarias para dejar las piezas preparadas para ser utilizadas.	64,68 €	40	2.587,00 €
2.2	Ud	Medida del ángulo de contacto	27,73 €	80	2.218,20 €
2.3	Ud	Aplicación de nanotratamiento sobre muestras metálicas	44,91 €	6	269,46 €
2.4	Ud	Aplicación de nanotratamiento sobre muestras PVC y mortero	46,37 €	8	370,98 €
2.5	Ud	Aplicación de tratamiento de plasma sobre todo tipo de muestras	23,67 €	72	1.704,19 €
2.6	Ud	Medida del ángulo de plano inclinado	35,02 €	108	3.782,62 €
2.7	Ud	Comprobación auto-limpieza	35,69 €	8	285,49 €
2.7	Ud	Toma de datos y resultados de los experimentos	410,96 €	1	410,96 €
3		Análisis de resultados y redacción de proyecto			
3.1	h	Análisis técnico de resultados de los ensayos en oficina técnica y redacción del proyecto, incluyendo borradores y versiones definitivas, originales y copias.	61,95 €	129	7.991,55 €
		Total general			19.971,70 €

Tabla 9: Resumen del presupuesto por actividades

4.3. Resumen por capítulos

Ref	Actividad	€
1	Previos	351,25 €
2	Preparación de muestras y experimentación en laboratorio	11.628,90 €
3	Análisis de resultados y redacción de proyecto	7.991,55 €
	Total general	19.971,70 €

Tabla 10: Resumen por capítulos

5. CONCLUSIONES

Se ha estudiado cómo los tratamientos varían las propiedades de las superficies de los materiales utilizados en este trabajo, algunos de ellos muy comunes en la construcción, centrándonos en el comportamiento de cada uno respecto al ángulo de deslizamiento y la autolimpieza.

Solamente se han alcanzado valores de θ clasificables como de superficie ultra-hidrofóbica¹⁰ en el cobre con la aplicación conjunta de ácido esteárico y nitrato de plata. En el resto de las superficies a los que se han aplicado tratamientos hidrofóbicos se ha comprobado que, aunque la gota tenga un ángulo de contacto parecido al de la superficie original sí que adquieren propiedades autolimpiantes y se reduce la inclinación de deslizamiento de manera notable. En particular, se ha visto cómo uno de los tratamientos (Tecnadis), además de reducir la pendiente, lo hace independientemente del tipo de agua utilizada (destilada limpia o carbonatada).

También se ha comprobado mediante la medida del ángulo de contacto que el tratamiento de plasma aumenta la mojabilidad de la superficie de forma diferente en los metales y en los polímeros ya que en éstos, a los 60'' de tratamiento, se tiende a la situación original.

Hemos explicado cómo la histéresis está relacionada con la heterogeneidad y las irregularidades superficiales, entre otros parámetros (apartado 1.2.2.3). Se han medido en el momento del deslizamiento y de forma gráfica las histéresis de la gota sobre PVC y cobre, ambos con tratamiento y sin él, y se han comparado. Se ha visto que en el PVC el valor es bastante mayor que en el cobre porque el tratamiento afecta a la estructura superficial del primero.

Los resultados de las comprobaciones de autolimpieza han sido también positivos e indican que los tratamientos pueden ser eficientes a la hora de evitar la sedimentación y solidificación de carbonato cálcico en las superficies de las tuberías de PVC. Se ha propuesto valorar este efecto mediante análisis de sales solubles en el agua utilizada.

¹⁰ Valores $120^\circ < \theta < 150^\circ$

6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

6.1 Bibliografía

- [1] D. M. Spori, "Structural influences on self-cleaning surfaces," ETH Zurich, Zurich, 2010.
- [2] J. C. J. M. N. Prf. Bharat Bhushan, «Lotus Effect: Surfaces with Roughness-Induced superhydrophobicity, self-Cleaning and Low Adhesion,» Ohio state University, Ohio.
- [3] N. J. S. M. I. N. Paul Roach, "Prograss in superhydrophobic surface development," The Royal Society of Chemistry, Londres, 2007.
- [4] F. J. M. Ruiz-Cabello, «Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómeno de mojado,» Universidad de Granada, Granada, 2009.
- [5] R. Blossey, "Sel-cleaning surfaces-virtual realities," *Nature Materials*, vol. 2, 2003.
- [6] T. Young, An essay on the cohesion of fluids, londres: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1805.
- [7] A. Marmur, «Soft contact: measurement and interpretation of contact angles,» *Sof Matter*, nº 2, pp. 12-17, 2006.
- [8] D. G. García, «Práctica de Superficies y Tratamientos Superficiales,» Barcelona, 2013.
- [9] M. Parals, *Materiales poliméricos y compuestos*, Barcelona: Apuntes asignatura Polímeros (Ing. Materiales), 2011.
- [10] Krüss GmbH, *DSA 14. Drop Shape Analysis system. Contact angle: Evaluation methods*, Hamburgo: Küss GmbH, 2010-2011.
- [11] A. M. Boris Krasovitski, "Drops Down the Hill: Theoretical Study of Limiting," Departments of Biomedical Engineering and Chemical Engineering, Technion, Haifa (Israel), 2005.
- [12] W. D. Callister Jr., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Barcelona: Reverté SA, 2010.
- [13] Asociación Técnica de Galvanización ATEG, «1. Galvanización General».
- [14] Fundación Bufí i Planas, «La corrosión del acero».
- [15] I. Martínez, *Termodinámica Básica y Aplicada*, Madrid: Dossat SA, 1992.
- [16] M. d. M. F. Jorge Hidalgo, «La mecánica de Leonardo da Vinci,» Noviembre 2002. [En línea]. Available: <http://www.nablanoesunvector.com>.

- [17] J. Bertihier, Microdrops and Digital Microfluidics: Processing, Development, and Applications, New York: William Andrew Publishing, 2007.
- [18] D. S. Gilliland, «A redox reaction: copper in silver nitrate solution,» Sarasota High School, [En línea]. Available: http://honorsph.startlogic.com/honorsphysicalscience/Cu_AgNO3/cu_agno3.html. [Último acceso: Junio 2013].
- [19] B. B. a. W. B. K. Koch, Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces, Soft Matter, 2008.
- [20] Wikipedia, «Wikipedia,» 31 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cutina>. [Último acceso: 11 julio 2013].

6.2 Gráficos

<i>Gráfico 1: Relación θ-vol de cada superficie con los distintos tipos de tratamientos.....</i>	<i>33</i>
<i>Gráfico 2: Diferencias de resultados en la lámina y la muestra de PVC para las aplicaciones superficiales Nanotool y Tecnadis</i>	<i>34</i>
<i>Gráfico 3: Comparación de θ por materiales y tratamientos superficiales.</i>	<i>35</i>
<i>Gráfico 4: Grados de inclinación de deslizamiento para cada material con una gota de agua destilada limpia o carbonatada.</i>	<i>38</i>
<i>Gráfico 5: Izquierda. Pendientes para el mortero con la superficie curada al aire libre. No aparece el ángulo con la superficie sin tratar porque la gota queda absorbida instantáneamente. Derecha. Ídem curada en molde.</i>	<i>40</i>

6.3 Ilustraciones

<i>Ilustración 1: Dibujo de Leonardo da Vinci del movimiento del agua en una catarata.</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 2: La combinación de composición química y topografía de la superficie proporciona un comportamiento hidrofóbico.</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 3: En este esquema se puede ver cómo afecta la superficie al efecto de autolimpieza, a la izquierda sin el efecto de autolimpieza y con la gota atravesando las partículas de la superficie por ser ésta lisa y la derecha, al ser una superficie rugosa, la gota atrapa a las partículas y las arrastra [1]</i>	<i>9</i>

<i>Ilustración 4: Diferentes estados de mojado, según las características de la superficie sobre la que descansa la gota: (a) Estado de Wenzel, hidrofilia, en la que la gota empapa y contacta con toda la superficie, (b) estado de Cassie-Baxter, hidrofobia, en la que la gota se apoya en un “colchón” de aire, (c) la gota se apoya en la superficie y el aire exterior circula por debajo, (d) al estar confinado el aire no circula por debajo de la gota, (e) combinación de los efectos c y d. Se pueden construir superficies auto-limpiantes con estructuras simples (f) y (g) o por combinación de varios efectos (h) e (i). [1]</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 5: Representación esquemática de una interfase y una interfaz [4].....</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 6: Esquema donde se indica el ángulo de contacto y las tensiones superficiales.</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 7: Representación esquemática de los ángulos intrínseco y aparente sobre una superficie rugosa: a) Homogénea y b) heterogénea. [4]</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 8: Esquema de los ángulos de avance θ_a y retroceso θ_r, empleados en la ecuación de Wenzel [1].</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 9: Relación entre la superficie geométrica o proyectada y la superficie real..</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 10: Las tres formas principales de mojado de una superficie; (a) estado de Wenzel, en el que el líquido se adapta a la topografía de la superficie, (b) estado de Cassie-Baxter, en el que la gota se apoya en los salientes de la superficie y (c) en donde el líquido se ha derramado por toda la topografía del sustrato [1].</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 11: Fórmula del ácido esteárico con la parte hidrofílica que se enlaza con el cobre marcada en verde [8].</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 12: Molécula del PVC.....</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 13: Molécula del teflón.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 14: Medida de los ángulos estático derecho θ_{ders} e izquierdo θ_{izqs} de la gota con la superficie.</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 15: Variación de la forma de la gota y del ángulo de contacto justo al depositar la gota y después de 60 segundos [10].</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 16: Esquema de una gota rodando sobre una superficie inclinada. El ángulo indicado es el alcanzado antes de que la gota inicie el movimiento.</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 17: Medición de la histéresis de una gota de agua sobre PVC sin tratar y en un plano inclinado.</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 18: En la parte superior la gota sobre la superficie de PVC sin tratamiento. En la parte inferior, ídem con tratamiento Tecnadis P.</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 19: Esquema del procedimiento de ADSA-P</i>	<i>60</i>

6.4 Imágenes

- Imagen 1: Dos fotografías del interior de una tubería de PVC afectada por la calcificación. La tubería llega a obstruirse por el carbonato cálcico (imágenes fuente propia). 4*
- Imagen 2: Izquierda: Fotografía de una gota de agua casi esférica sobre una hoja de flor de loto. Derecha: mismo efecto en una hoja de otra planta donde las gotas no son tan esféricas como en la imagen anterior de la flor de loto. 7*
- Imagen 3: a.) Croquis de cutícula y la estructura estratificada de la epidermis de una hoja. En algunas plantas, además de la cutina, existen filamentos de cera que dan un entramado tridimensional a la superficie. c.) Imagen SEM de la superficie de la hoja de Flor de Loto donde se aprecian protuberancias cónicas que y, en el espacio que hay entre ellas, unas fisuras (ver flecha) por donde la hoja realiza la transpiración. d.) Imagen SEM de la superficie ampliada de las protuberancias donde se aprecia que está formada por filamentos de cera cristalina. [1] 7*
- Imagen 4: Equipo utilizado para autolimpieza 27*
- Imagen 5: Medidor de gotas Krüss DSA14. Se aprecia la plataforma, la cámara y la pantalla retro-iluminada. 28*
- Imagen 6: Fotografía de una gota sobre la placa tratada con Lotusan, el software del equipo de medida no podía dar precisión. En este caso, la línea de aproximación no se adapta a la forma de la gota (flechas) para el método Tangente 2 y el resultado sería $\theta = 70.7 \pm 17.12$ grados. Al medirlo en el apartado 7.2 tenemos que $\theta \approx 62^\circ$ 29*
- Imagen 7: Plano inclinado utilizado en la medición del deslizamiento y la autolimpieza 30*
- Imagen 8: Equipo de plasma de corona, empleado para aumentar la hidrofiliidad de las superficies. 30*
- Imagen 9: i) Primera fila (siempre de izquierda a derecha), tres gotas sobre PVC; sin tratamiento, Nanotool y plasma 30''. ii) Segunda fila, cuatro gotas sobre cobre; sin tratamiento, Nanotool, plasma 30'', ác. esteárico+nitrato de plata. iii) Tercera fila, cuatro gotas sobre aluminio: sin tratamiento, Nanotool, plasma 60'', ác. esteárico+nitrato de plata. iv) Cuatro gotas sobre teflón; sin tratamiento, plasma 20'', 30'' y 60''. 32*
- Imagen 10: Fotografías de la placa que se ha tratado superficialmente en el laboratorio con Tecnadis Protect y Tecnadis Effect. A la izquierda la placa con la superficie curada al aire libre con la mancha de agua después de ser absorbida. A la derecha la placa curada en molde. 34*
- Imagen 11: Seis gotas con diferentes tratamientos superficiales en el cobre. Fila superior, de izquierda a derecha; sin tratamiento, plasma de arco 60'' y nitrato de plata. Fila*

<i>inferior, de izquierda a derecha; con ácido esteárico, con nitrato de Ag + ácido esteárico y con Nanotool.</i>	<i>36</i>
<i>Imagen 12: Secuencia de fotogramas del aumento de la pendiente hasta el momento que se produce el deslizamiento. En la hilera superior, con la superficie de PVC sin tratar, y en la inferior, con la superficie de PVC tratada con Tecnadis P.....</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 13: En esta serie de fotografías se puede apreciar cuándo desliza la gota sobre Al, según el tratamiento recibido. La imagen más cercana no tiene tratamiento, la central tiene Nanotool y la más lejana Tecnadis P.</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 14: Placa de PVC con Nanotool antes (arriba) y después (abajo). En la zona ampliada (flecha) se ven los puntos donde se ha desprendido el CaCO_3 y en el cuerpo de la placa inferior se aprecia la zona “lavada” donde se ha depositado el carbonato proveniente del agua que ha circulado por la placa. Sentido del agua; de izquierda a derecha.</i>	<i>42</i>
<i>Imagen 15: Segmento de tubería tratada con Nanotool (arriba) en la que se indica con flechas la zona lavada central y la zona donde se ha desprendido el CaCO_3 (ampliación). En el segmento sin tratamiento (abajo) el sedimento no ha sufrido cambios. Sentido del agua: de izquierda a derecha.</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 16: Fotografías de la tubería tratada con Tecnadis antes (arriba) y después (debajo) del proceso de lavado. Se aprecia claramente la zona lavada (izquierda) por el impacto de la gota y las zonas lavadas en el tramo central y final (derecha). Sentido del agua; de izquierda a derecha.</i>	<i>43</i>

6.5 Tablas

<i>Tabla 1: Clasificación de las superficies en función de los ángulos observables θ_{ob} máximo y mínimo.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2: Características de los métodos de cálculo empleados por el equipo DSA14 Krüss.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3: Diferencia en la media del ángulo de contacto de las gotas medidas en la lámina o la muestra de PVC.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4: Comparación del ángulo de contacto medio entre materiales, según el tratamiento aplicado al soporte (*placa de la muestra de fábrica).</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 5: Ángulo de deslizamiento de una gota de agua destilada (cabecera en azul) y de agua carbonatada (cabecera en marrón).</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 6: Variación de las pendientes en número de grados con respecto al original, al comparar las pendientes de deslizamiento entre superficies tratadas y no tratadas (cifras en azul cuando la pendiente se reduce).</i>	<i>37</i>

<i>Tabla 7: Variación de las pendientes en grados, al utilizar una gota de agua destilada o carbonatada, en superficies tratadas y no tratadas (cifras en azul cuando la pendiente se reduce).</i>	38
<i>Tabla 8: Listado de actividades presupuestadas</i>	46
<i>Tabla 9: Resumen del presupuesto por actividades</i>	47
<i>Tabla 10: Resumen por capítulos</i>	47
<i>Tabla 12: Listado de precios unitarios</i>	68
<i>Tabla 13: Desglose de precios</i>	72

7. EPÍLOGO

Se ha estudiado cómo varía con diferentes nano-tratamientos superficiales el comportamiento frente al agua en materiales de uso común en la construcción general y en instalaciones de conducción de agua. Para ello se ha estudiado el efecto de varios tratamientos comerciales sobre PVC, aluminio, cobre, teflón y mortero de cemento portland, analizando la hidrofobicidad, la auto-limpieza y el ángulo de deslizamiento antes y después de la aplicación de los nano-tratamientos superficiales.

A la hora de seleccionar los nano-tratamientos se ha constatado que es difícil encontrarlos en España y que principalmente se encuentran para ser aplicados en materiales porosos y vidrios.

- [1] D. M. Spori, "Structural influences on self-cleaning surfaces," ETH Zurich, Zurich, 2010.
- [2] J. C. J. M. N. Prf. Bharat Bhushan, «Lotus Effect: Surfaces with Roughness-Induced superhydrophobicity, self-Cleaning and Low Adhesion,» Ohio state University, Ohio.
- [3] N. J. S. M. I. N. Paul Roach, "Prograss in superhydrophobic surface development," The Royal Society of Chemistry, Londres, 2007.
- [4] F. J. M. Ruiz-Cabello, «Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómeno de mojado,» Universidad de Granada, Granada, 2009.
- [5] R. Blossey, "Sel-cleaning surfaces-virtual realities," *Nature Materials*, vol. 2, 2003.
- [6] T. Young, An essay on the cohesion of fluids, londres: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1805.
- [7] A. Marmur, «Soft contact: measurement and interpretation of contact angles,» *Sof Matter*, nº 2, pp. 12-17, 2006.
- [8] D. G. García, «Práctica de Superficies y Tratamientos Superficiales,» Barcelona, 2013.
- [9] M. Parals, *Materiales poliméricos y compuestos*, Barcelona: Apuntes asignatura Polímeros (Ing. Materiales), 2011.
- [10] Krüss GmbH, *DSA 14. Drop Shape Analysis system. Contact angle: Evaluation methods*, Hamburgo: Küss GmbH, 2010-2011.
- [11] A. M. Boris Krasovitski, "Drops Down the Hill: Theoretical Study of Limiting," Departments of Biomedical Engineering and Chemical Engineering, Technion, Haifa (Israel), 2005.
- [12] W. D. Callister Jr., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Barcelona: Reverté SA, 2010.
- [13] Asociación Técnica de Galvanización ATEG, «1. Galvanización General».

- [14] Fundación Bufí i Planas, «La corrosión del acero».
- [15] I. Martínez, Termodinámica Básica y Aplicada, Madrid: Dossat SA, 1992.
- [16] M. d. M. F. Jorge Hidalgo, «La mecánica de Leonardo da Vinci,» Noviembre 2002. [En línea]. Available: <http://www.nablanoesunvector.com>.
- [17] J. Bertihier, Microdrops and Digital Microfluidics: Processing, Development, and Applications, New York: William Andrew Publishing, 2007.
- [18] D. S. Gilliland, «A redox reaction: copper in silver nitrate solution,» Sarasota High School, [En línea]. Available: http://honorsph.startlogic.com/honorsphysicalscience/Cu_AgNO3/cu_agno3.html. [Último acceso: Junio 2013].
- [19] B. B. a. W. B. K. Koch, Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces, Soft Matter, 2008.
- [20] Wikipedia, «Wikipedia,» 31 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cutina>. [Último acceso: 11 julio 2013].

8. ANEXOS

8.1. Medida de la histéresis

8.1.1. Gota de agua sobre lámina de PVC

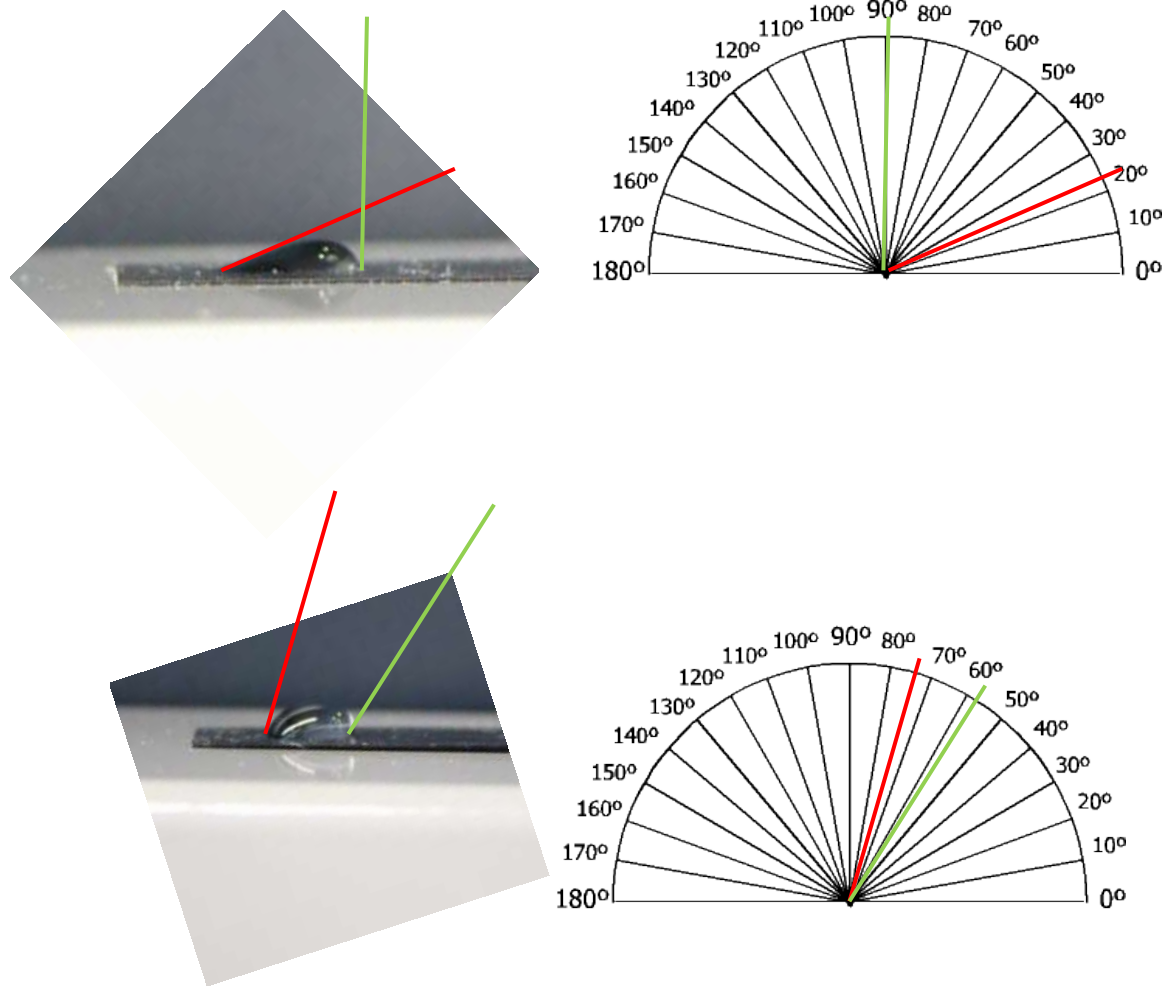


Ilustración 18: En la parte superior la gota sobre la superficie de PVC sin tratamiento. En la parte inferior, ídem con tratamiento Tecnadis P.

Para la estimación de los ángulos dinámicos de avance θ_a^s y retroceso θ_r^s de la gota con la superficie inclinada se ha tomado la fotografía en el momento previo al deslizamiento y se ha girado, de forma que la base aparezca horizontal. Entonces se ha superpuesto un transportador de ángulos y se toma la medida del ángulo que forma la línea tangente (color) con la horizontal.

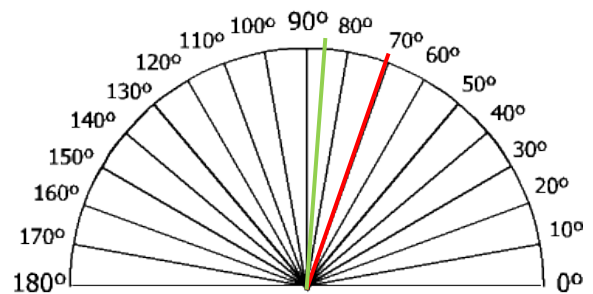
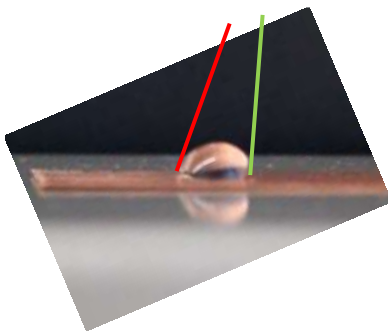
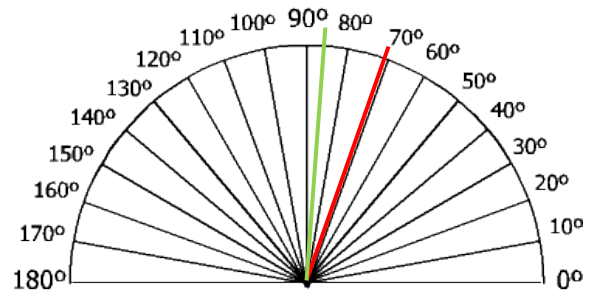
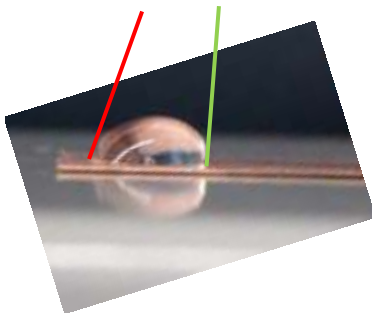
- Superficie sin tratar:
 - $\theta_a^s = 180 - 90^\circ \pm 5^\circ = 90^\circ \pm 5^\circ$

- $\theta_r^s = 24^\circ \pm 5^\circ$
- $H = \theta_a^s - \theta_r^s = (90^\circ \pm 5^\circ) - (24^\circ \pm 5^\circ) = 66^\circ \pm 5^\circ$

- Superficie tratada:

- $\theta_a^s = 180 - 58^\circ \pm 5^\circ = 122^\circ \pm 5^\circ$
- $\theta_r^s = 73^\circ \pm 5^\circ$
- $H = \theta_a^s - \theta_r^s = (122^\circ \pm 5^\circ) - (73^\circ \pm 5^\circ) = 49^\circ \pm 5^\circ$

8.1.2. Gota de agua sobre lámina de cobre



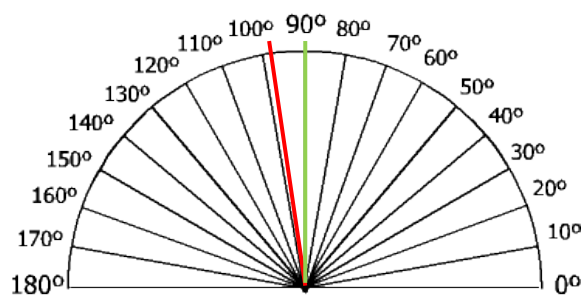
Si observamos las medidas anteriores, son idénticas, lo que nos viene a indicar que apenas tiene influencia en las propiedades superficiales la aplicación o no del tratamiento superficial al utilizar agua destilada.

- Superficie sin tratar y tratada:

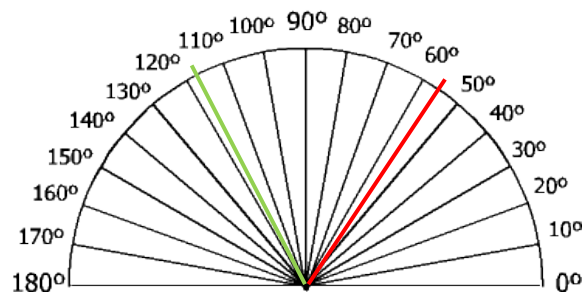
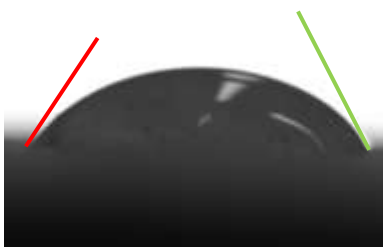
- $\theta_a^s = 180 - 85^\circ \pm 5^\circ = 95^\circ \pm 5^\circ$
- $\theta_r^s = 70^\circ \pm 5^\circ$
- $H = \theta_a^s - \theta_r^s = (95^\circ \pm 5^\circ) - (70^\circ \pm 5^\circ) = 15^\circ$

8.2. Medida de los ángulos de contacto

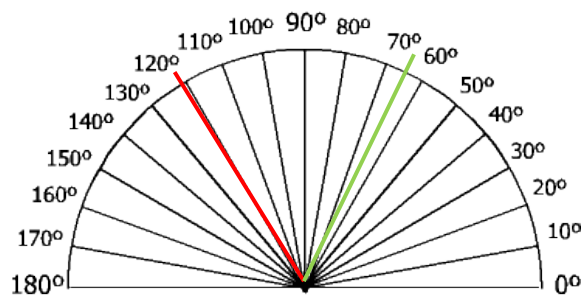
8.2.1. Mortero



- Placa, lado molde, con tratamiento Tecnadis Effect
 - $\theta_{izq} = 98^\circ \pm 5^\circ$
 - $\theta_{der} = 90^\circ \pm 5^\circ$



- Placa con STO Lotusan (gota 1)
 - $\theta_{izq} = 55^\circ \pm 5^\circ$
 - $\theta_{der} = 62^\circ \pm 5^\circ$



- Placa con STO Lotusan (gota 2)
 - $\theta_{izq} = 65^\circ \pm 5^\circ$
 - $\theta_{der} = 59^\circ \pm 5^\circ$

8.3. Técnica de medida ADSA-P

Es la utilizada por el equipo con el que se han medido en este trabajo los ángulos de contacto y el volumen de las gotas.

La técnica ADSA-P (del ing. ADSA Profile) consiste en la obtención de un perfil lateral de la gota o burbuja a partir de una imagen digital de la misma. El algoritmo ajusta dicho perfil al perfil teórico más idóneo, variando los parámetros libres mencionados (*Ilustración 19*). La potencia de este método radica en que no es necesario introducir ningún parámetro interfacial inicial. Sólo es necesario obtener la relación píxel-centímetro de la imagen, la densidad del líquido (en rigor, la diferencia de densidades del líquido con su vapor) y la gravedad local. El método se emplea para la medida de la tensión interfacial y del ángulo del contacto, aunque también proporciona medidas geométricas como radios de contacto y volúmenes. Es importante enfatizar que para un correcto uso de esta técnica las gotas o burbujas empleadas deben ser de revolución.



Ilustración 19: Esquema del procedimiento de ADSA-P

8.4. Tablas de resultados

8.4.1. PVC

tipo	tratam	gota	fecha	nº	ang deg +-1	" +/- "	vol (µl)	metodo	ang deg +-1 medio	vol medio (µl)
lámina	no	1	09-may	37	82,5	0,88	35,08	1	82,9	34,56
lámina	no	1	09-may	38	84,0	0,74		2	82,9	34,56
lámina	no	1	09-may	39	73,4		34,9	circ	82,9	34,56
lámina	no	1	09-may	40	82,2		34,03	sessile	82,9	34,56
lámina	no	1	09-may	41	72,6			h/w	82,9	34,56
lámina	no	2	09-may	46	68,5	2,1	55,88	1	68,9	55,54
lámina	no	2	09-may	47	71,0	1,68		2	68,9	55,54
lámina	no	2	09-may	48	57,4		55,59	circ	68,9	55,54
lámina	no	2	09-may	49	67,1		55,2	sessile	68,9	55,54
lámina	no	2	09-may	50	58,0			h/w	68,9	55,54
lámina	plasma 30"	1	09-may	126	43,7	4,55	32,66	1	42,4	32,66
lámina	plasma 30"	1	09-may	127	41,1	3,5		2	42,4	32,66
lámina	plasma 30"	1	09-may	128	36,3		33,34	circ	42,4	32,66
lámina	plasma 60"	2	09-may	122	52,0	0,57	39,17	1	51,2	39,17
lámina	plasma 60"	2	09-may	123	50,4	2,07		2	51,2	39,17
lámina	plasma 60"	2	09-may	124	41,9		39,17	circ	51,2	39,17
lámina	nanotool	1	10-may	1	89,0	0,08	13,44	1	80,8	13,36
lámina	nanotool	1	10-may	2	92,4	0,94		2	80,8	13,36
lámina	nanotool	1	10-may	3	80,8		13,36	circ	80,8	13,36
lámina	nanotool	2	10-may	5	73,2	1,17	16,58	1	61,1	16,50
lámina	nanotool	2	10-may	6	73,2			2	61,1	16,50
lámina	nanotool	2	10-may	7	61,1		16,5	circ	61,1	16,50
lámina	nanotool	3	10-may	9	72,6	1,99	19,18	1	61,6	19,06
lámina	nanotool	3	10-may	10	74,4	1,53		2	61,6	19,06
lámina	nanotool	3	10-may	11	61,6		19,06	circ	61,6	19,06
muestra	nanotool	1	04-jun	1	74,9	0,95	37,89	1	70,5	37,89
muestra	nanotool	1	04-jun	2	66,1	5,07		2	70,5	37,89
muestra	nanotool	1	04-jun	3	67,3			h/w	70,5	37,89
muestra	nanotool	1	04-jun	4	67,1		37,7	circ	70,5	37,89
muestra	nanotool	2	04-jun	6	77,6	0,53	58,63	1	83,1	58,63
muestra	nanotool	2	04-jun	7	88,6	16,23		2	83,1	58,63
muestra	nanotool	2	04-jun	8	68,8			h/w	83,1	58,63
muestra	nanotool	2	04-jun	9	67,7		58,48	circ	83,1	58,63
muestra	tecnadis	3	17-jun	1	77	0,06	55,92	1	76,7	53,66
muestra	tecnadis	3	17-jun	2	76	1,47	51,39	2	76,7	53,66
muestra	tecnadis	3	17-jun	3	67,2			h/w	76,7	53,66
muestra	tecnadis	3	17-jun	4	66,5		51,39	circ	76,7	53,66
muestra	tecnadis	3	17-jun	5	77		51,39	sessile	76,7	53,66
muestra	tecnadis	4	17-jun	7	72,3	0,08	53,77	1	72,7	53,56
muestra	tecnadis	4	17-jun	8	73,2	1,39		2	72,7	53,56
muestra	tecnadis	4	17-jun	9	63,5			h/w	72,7	53,56
muestra	tecnadis	4	17-jun	10	62,8		53,46	circ	72,7	53,56
muestra	tecnadis	4	17-jun	11	72,6		53,34	sessile	72,7	53,56
lámina	tecnadis	1	04-jun	1	73,2	1,32	18,15	1	68,4	17,87
lámina	tecnadis	1	04-jun	2	68,4		17,87	circ	68,4	17,87
lámina	tecnadis	2	04-jun	3	78,6	1,47	19,01	1	71,4	18,89
lámina	tecnadis	2	04-jun	4	71,4		18,89	circ	71,4	18,89

8.4.2. Teflón

tipo	tratam	gota	fecha	nº	ang deg +-1	"+/-"	vol (µl)	metodo	ang deg +-1 medio	vol medio (µl)
lámina	no	1	09-may	0	90,7	0,5	42,84	1	92,5	71,74
lámina	no	1	09-may	1	94,1	1,19		2	92,5	71,74
lámina	no	1	09-may	2	80,4		42,52	circ	92,5	71,74
lámina	no	1	09-may	3	92,7		43,25	sessile	92,5	71,74
lámina	no	1	09-may	4	82,5			h/w	92,5	71,74
lámina	no	2	09-may	6	106,4	0,86	57,2	1	104,9	99,78
lámina	no	2	09-may	7	106,4	0,85	57,19	2	104,9	99,78
lámina	no	2	09-may	8	86,3		62,52	circ	104,9	99,78
lámina	no	2	09-may	9	101,9		62,53	sessile	104,9	99,78
lámina	no	2	09-may	10	95,4	1,99		h/w	104,9	99,78
lámina	no	4	09-may	24	90,3	0,59	51,38	1	91,4	84,78
lámina	no	4	09-may	29	100,7	1,8		2	91,4	84,78
lámina	no	4	09-may	30	83,2		50,49	circ	91,4	84,78
lámina	no	4	09-may	33	83,1		50,36	sessile	91,4	84,78
lámina	no	4	09-may	34	97,6		50,51	h/w	91,4	84,78
lámina	plasma 20"	1	09-may	102	75,4	1,27	47,93	1	73,3	47,9
lámina	plasma 20"	1	09-may	103	71,2	0,23		2	73,3	47,93
lámina	plasma 20"	1	09-may	104	67,2		47,68	circ	73,3	47,93
lámina	plasma 30"	1	09-may	110	72,1	1,45	52,6	1	70,3	52,6
lámina	plasma 30"	1	09-may	111	68,4	0,44		2	70,3	52,60
lámina	plasma 30"	1	09-may	112	64,5		52,34	circ	70,3	52,60
lámina	plasma 60"	1	09-may	118	93,3	1,26	51,17	1	94,2	51,2
lámina	plasma 60"	1	09-may	119	95,1	3,81		2	94,2	51,17
lámina	plasma 60"	1	09-may	120	82,2		50,69	circ	94,2	51,17

8.4.3. Cobre

tipo	tratam	gota	fecha	nº	ang deg +-1	" +/- "	vol (µl)	metodo	ang deg +-1 medio	vol medio (µl)
lámina	no	1	09-may	60	100,8	0,44	63,87	1	101,5	63,41
lámina	no	1	09-may	61	98,2	2,15		2	101,5	63,41
lámina	no	1	09-may	65	87,6			h/w	101,5	63,41
lámina	no	1	09-may	63	105,5		62,95	sessile	101,5	63,41
lámina	no	1	09-may	66	86,8		62,69	circ	101,5	63,41
lámina	no	2	09-may	68	86,4		61,74	circ	96,3	57,26
lámina	no	2	09-may	70	97,8	0,17		2	96,3	57,26
lámina	no	2	09-may	71	89,1			h/w	96,3	57,26
lámina	no	2	09-may	72	88,4		52,77	circ	96,3	57,26
lámina	no	2	09-may	73	104,8		52,47	sessile	96,3	57,26
lámina	no	3	09-may	75	99,4	0,21	52,33	1	96,9	52,33
lámina	no	3	09-may	76	94,3	4,82		2	96,9	52,33
lámina	no	3	09-may	78	87,8		51,87	circ	96,9	52,33
lámina	no	3	09-may	81	88,6			h/w	96,9	52,33
lámina	plasma 30"	2	09-may	133	17,1	0,79		2	16,9	12,94
lámina	plasma 30"	2	09-may	134	16,9		12,94	circ	16,9	12,94
lámina	plasma 60"	3	09-may	136	36,6	8,82	6,69	1	14,8	6,72
lámina	plasma 60"	3	09-may	137	17	1,48		2	14,8	6,72
lámina	plasma 60"	3	09-may	138	14,8		6,72	circ	14,8	6,72
lámina	nittrato	1	10-may	1	103,7	0,78	16,7	1	94,7	16,10
lámina	nittrato	1	10-may	2	92,8	6,46		2	94,7	16,10
lámina	nittrato	1	10-may	3	95,1		16,1	circ	94,7	16,10
lámina	nittrato	1	10-may	4	94,3			h/w	94,7	16,10
lámina	nittrato	2	10-may	6	102,6	0,12	18,69	1	95,1	18,62
lámina	nittrato	2	10-may	7	103,5	2,82		2	95,1	18,62
lámina	nittrato	2	10-may	8	95,2		18,62	circ	95,1	18,62
lámina	nittrato	2	10-may	9	94,9			h/w	95,1	18,62
lámina	estearico	1	10-may	21	99,4	0,21	33,92	1	100,3	33,92
lámina	estearico	1	10-may	22	101,1	1,27		2	100,3	33,92
lámina	estearico	1	10-may	23	90,7		33,69	circ	100,3	33,69
lámina	estearico	1	10-may	24	91,1			h/w	100,3	33,92
lámina	estearico	2	10-may	26	93,8	0,96	41,1	1	90,1	41,10
lámina	estearico	2	10-may	27	86,3	0,53		2	90,1	41,10
lámina	estearico	2	10-may	28	83,6		40,8	circ	90,1	40,80
lámina	estearico	2	10-may	29	84			h/w	90,1	40,80
lámina	est+nit	1	10-may	31	127,9	0,08	42,64	1	129,8	42,64
lámina	est+nit	1	10-may	32	131,6	2,37		2	129,8	42,64
lámina	est+nit	1	10-may	33	115,8		42,57	circ	129,8	42,57
lámina	est+nit	1	10-may	34	113,9			h/w	129,8	42,57
lámina	est+nit	2	10-may	37	117,8	0,72	32,89	1	114,9	32,89
lámina	est+nit	2	10-may	38	112	1,57		2	114,9	32,89
lámina	est+nit	2	10-may	39	108		32,59	circ	114,9	32,59
lámina	est+nit	2	10-may	40	106,7	L		h/w	114,9	32,59
lámina	nanotool	1	10-may	30	81	0,15	19,09	1	74,3	18,99
lámina	nanotool	1	10-may	31	79,7	0,2		2	74,3	18,99
lámina	nanotool	1	10-may	32	74,3		18,99	circ	74,3	18,99
lámina	nanotool	2	10-may	34	77,3	0,26	23,72	1	77,3	23,72
lámina	nanotool	2	10-may	35	77,5	0,72		2	77,3	23,72
lámina	nanotool	2	10-may	36	69,4		23,58	circ	77,3	23,72
lámina	nanotool	3	10-may	25	94,6	0,19	17,72	1	87,6	19,61
lámina	nanotool	3	10-may	26	96,4	0,96		2	87,6	19,61
lámina	nanotool	3	10-may	27	87,6		19,61	circ	87,6	19,61
lámina	tecnadis	1	10-may		89,02	0,23	42,18	1	89,0	42,18
lámina	tecnadis	1	10-may		88,4	1,44	43,57	circ	89,0	42,18

8.4.4. Aluminio

tipo	tratam	gota	fecha	nº	ang deg +-1	" +/- "	vol (µl)	metodo	ang deg +-1 medio	vol medio (µl)
lámina	no	1	09-may	148	84,4	0,64	24,9	1	83,0	24,90
lámina	no	1	09-may	149	81,5	3,18		2	83,0	24,90
lámina	no	1	09-may	150	78,8		24,8	circ	83,0	24,90
lámina	no	2	09-may	152	74,8	1,85	16,14	1	71,0	16,1
lámina	no	2	09-may	153	73,3	2,58		2	71,0	16,1
lámina	no	2	09-may	154	71		16,09	circ	71,0	16,09
lámina	plasma 30"	1	09-may	140	38,7	1,54	24,68	1	38,5	24,68
lámina	plasma 30"	1	09-may	141	38,3	1,38		2	38,5	24,68
lámina	plasma 30"	1	09-may	142	35		24,66	circ	38,5	24,68
lámina	plasma 60"	2	09-may	144	18,3	1,01	10,13	1	16,0	10,1
lámina	plasma 60"	2	09-may	145	19,3	0,33		2	16,0	10,1
lámina	plasma 60"	2	09-may	146	16		10,14	circ	16,0	10,14
lámina	nitrato	1	10-may	11	87,6	1,32	34,74	1	87,4	34,74
lámina	nitrato	1	10-may	12	87,1	3,69		2	87,4	34,74
lámina	nitrato	1	10-may	13	80,5		34,54	circ	87,4	34,74
lámina	nitrato	1	10-may	14	81,1			h/w	87,4	34,74
lámina	nitrato	2	10-may	16	78,8	0,78	48,69	1	80,4	48,69
lámina	nitrato	2	10-may	17	81,9	2,2		2	80,4	48,69
lámina	nitrato	2	10-may	18	72,2		48,55	circ	80,4	48,69
lámina	nitrato	2	10-may	19	72,9			h/w	80,4	48,69
lámina	est+nit	1	10-may	42	72,3	0,15	55,11	1	71,9	55,11
lámina	est+nit	1	10-may	43	71,4	1,12		2	71,9	55,11
lámina	est+nit	1	10-may	44	65,8			h/w	71,9	55,11
lámina	est+nit	1	10-may	45	65,3		54,83	circ	71,9	55,11
lámina	est+nit	2	10-may	47	79,2	0,3	41,81	1	79,9	41,81
lámina	est+nit	2	10-may	48	80,5	0,6		2	79,9	41,81
lámina	est+nit	2	10-may	49	68,9		41,55	circ	79,9	41,81
lámina	est+nit	2	10-may	50	69,7			h/w	79,9	41,81
lámina	nanotool	1	10-may	39	79,3		36,09	circ	82,7	35,97
lámina	nanotool	1	10-may	40	82,7	0,88		2	82,7	35,97
lámina	nanotool	1	10-may	41	68,9		35,85	circ	82,7	35,97
lámina	nanotool	2	10-may	43	75,5	0,07	21,81	1	75,8	21,81
lámina	nanotool	2	10-may	44	76	2,4			75,8	21,81
lámina	nanotool	2	10-may	45	66,7		21,72	circ	75,8	21,72
lámina	nanotool	3	10-may	47	83,1	1,02	41,98	1	83,1	41,98
lámina	nanotool	3	10-may	48	83	2,35		2	83,1	41,98
lámina	nanotool	3	10-may	49	72,3		41,68	circ	83,1	41,68
lámina	tecnadis	1		1	79,4	0,8	38,4	1	79,9	38,40
lámina	tecnadis	1		2	80,4	1,13		2	79,9	38,40
lámina	tecnadis	1		3	79,8		31,8	circ	79,9	31,80

8.4.5. Mortero

tipo	tratam	gota	fecha	nº	ang deg +-1	"+/-"	vol (µl)	metodo	ang deg +-1 medio	vol medio (µl)
muestra	lotusan	1	17-jun	1	61,9	1,85	37,61	1	58,6	37,61
muestra	lotusan	1	17-jun	2	55,2	6,19		2	58,6	37,61
muestra	lotusan	1	17-jun	3	51,7		37,74	circ	58,6	37,61
muestra	lotusan	2	17-jun	5	64	1,15	28,41	1	67,4	28,41
muestra	lotusan	2	17-jun	6	70,7	17,12		2	67,4	28,41
muestra	lotusan	2	17-jun	5	58,9		28,43	circ	67,4	28,41
muestra	lotusan	3	17-jun	10	59,1	0,17	9,2	1	54,6	9,23
muestra	lotusan	3	17-jun	11	48,4	3,69		2	54,6	9,23
muestra	lotusan	3	17-jun	12	54,6		9,23	circ	54,6	9,23
molde	tecnadis	1	10-jul	1				gráfico	94,0	
muestra	lotusan	1	10-jul	1				gráfico	58,5	37,6
muestra	lotusan	2	10-jul	2				gráfico	62,0	28,41

8.5. Fichas técnicas

Se incluyen las fichas técnicas de los tratamientos comerciales Nanotool y Tecnadis.

8.6. Justificación económica del presupuesto

En las tablas siguientes se justifican los precios de las actividades valoradas en el presupuesto.

8.6.1. Precios unitarios

Tabla con los precios unitarios utilizados para valorar las actividades.

Ref	Ud	Actividad	€/ud
p1		Mano de obra	
pp11	h	Profesor titulado	90
p12	h	Técnico titulado	60
p13	h	Administrativo	50
p2		Materiales	
p2.1	ud	Placa cobre rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	2,7
p2.2	ud	Placa aluminio rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	2,5
p2.3	ud	Placa PVC rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	0,75
p2.4	ud	Placa teflón rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	1,5
p2.5	ud	Tubería PVC D90mm, 200mm de longitud	4,5
p2.6	l	Nanotratamiento marca Tecnadís para cubrir materiales porosos o poco porosos.	15
p2.7	l	Nanotratamiento marca Tecnadís para cubrir materiales porosos o poco porosos	18
p2.8	l	Nanotratamiento marca Nanotool para cubrir todo tipo de materiales poco porosos, incluye aplicación tipo previa o primer	200
p2.9	kg	Ácido esteárico o estearina	7,5
p2.10	l	Nitrato de Ag, varias concentraciones	80
p2.11	l	Agua destilada	0,5
p2.12	l	Etanol	1
p3		Instrumentos y medios auxiliares	
p3.1	d	Alquiler de equipo de plasma PHYWE	12

p3.2	d	Alquiler de equipo de plano inclinado	6
p3.3	d	Alquiler de equipo medición gotas Krüss y pc para tratamiento de imágenes	20
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30
p3.5	pa	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	
p4		Seguridad y salud personal	
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30

Tabla 11: Listado de precios unitarios

8.6.2. Precios desglosados de las actividades

En la tabla siguiente se desglosa el precio de cada actividad.

Ref	Ud	Actividad			€/ud
1		Previos			
1.1	Ud	Selección y suministro de nano-tratamientos para los ensayos en PVC, incluyendo el transporte del material.			165,00 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p1.3	h	Administrativo	40,00	2,000	80,00 €
p2.6	l	Nanotratamiento marca Tecnadís para cubrir materiales porosos o poco porosos.	15,00	1,000	15,00 €
p2.7	l	Nanotratamiento marca Tecnadís para cubrir materiales porosos o poco porosos\$\$\$\$	18,00	1,000	18,00 €
p2.8	l	Nanotratamiento marca Nanotool para cubrir todo tipo de materiales poco porosos, incluye aplicación tipo previa o primer	200,00	0,250	50,00 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	80,00	0,025	2,00 €
1.2	Ud	Selección y suministro de nano-tratamientos para los ensayos en metales, incluyendo el transporte del material.			103,50 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p1.3	h	Administrativo	40,00	2,000	80,00 €
p2.9	kg	Ácido esteárico o estearina	7,50	0,200	1,50 €
p2.10	l	Nitrato de Ag, varias concentraciones	80,00	0,250	20,00 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	80,00	0,025	2,00 €
1.3	Ud	Suministro de muestras para los ensayos de metales (aluminio y cobre) y polímeros (PVC y teflón)			82,75 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p1.3	h	Administrativo	40,00	1,000	40,00 €
p2.1	ud	Placa cobre rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	2,70	5,000	13,50 €
p2.2	ud	Placa aluminio rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	2,50	5,000	12,50 €
p2.3	ud	Placa PVC rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	0,75	5,000	3,75 €
p2.4	ud	Placa teflón rectangular máximo 100x40x1,5mm, acabado satinado	1,50	5,000	7,50 €
p2.5	ud	Tubería PVC D90mm, 200mm de longitud	4,50	1,000	4,50 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	40,00	0,025	1,00 €
2		Preparación de muestras y experimentación en laboratorio			

2.1	h	Preparación de todo tipo de muestras mediante corte manual en diferentes tamaños, limpieza con etanol o agua destilada y todas las operaciones necesarias para dejar las piezas preparadas para ser utilizadas.			64,68 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	1,000	50,00 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,100	9,00 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,125	3,75 €
p2.11	l	Agua destilada	0,50	0,100	0,05 €
p2.12	l	Etanol	1,00	0,100	0,10 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,010	0,30 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	59,00	0,025	1,48 €
2.2	Ud	Medida del ángulo de contacto			27,73 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	0,500	25,00 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,010	0,90 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,011	0,33 €
p3.3	d	Alquiler de equipo medición gotas Krüss y pc para tratamiento de imágenes	20,00	0,011	0,22 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,021	0,63 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	25,90	0,025	0,65 €
2.3	Ud	Aplicación de nanotratamiento sobre muestras metálicas			44,91 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	0,750	37,50 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,050	4,50 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,032	0,96 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,030	0,90 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	42,00	0,025	1,05 €
2.4	Ud	Aplicación de nanotratamiento sobre muestras PVC y mortero			46,37 €

Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	0,750	37,50 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,060	5,40 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,050	1,50 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,030	0,90 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	42,90	0,025	1,07 €
2.5	Ud	Aplicación de tratamiento de plasma sobre todo tipo de muestras			23,67 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	0,400	20,00 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,010	0,90 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,005	0,15 €
p3.1	d	Alquiler de equipo de plasma PHYWE	12,00	0,005	0,06 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,030	0,90 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	66,37	0,025	1,66 €
2.6	Ud	Medida del ángulo de plano inclinado			35,02 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	0,600	30,00 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,025	2,25 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,013	0,39 €
p3.2	d	Alquiler de equipo de plano inclinado	6,00	0,013	0,08 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,050	1,50 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	32,25	0,025	0,81 €
2.7	Ud	Comprobación auto-limpieza			35,69 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	0,600	30,00 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,015	1,35 €

p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,032	0,96 €
p3.2	d	Alquiler de equipo de plano inclinado	6,00	0,032	0,19 €
p4.1	ud	Guantes, pinzas, papel secante y otro pequeño material	30,00	0,080	2,40 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	31,35	0,025	0,78 €
2.7	Ud	Toma de datos y resultados de los experimentos			410,96 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	8,000	400,00 €
p3.4	d	Alquiler de laboratorio, incluida pp de consumo eléctrico, de agua y dotado de campana de seguridad con extractor, fregadero, mobiliario y herramientas para manipulación de muestras.	30,00	0,032	0,96 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	400,00	0,025	10,00 €
3		Análisis de resultados y redacción de proyecto			
3.1	h	Análisis técnico de resultados de los ensayos en oficina técnica y redacción del proyecto, incluyendo borradores y versiones definitivas, originales y copias.			61,95 €
Ref	Ud	Definición	Precio	Cantidad	€
p12	h	Técnico titulado	50,00	1,000	50,00 €
pp11	h	Profesor titulado	90,00	0,100	9,00 €
p3.5	%	Gastos auxiliares sobre la mano de obra	59,00	0,050	2,95 €
		Total general			

Tabla 12: Desglose de precios